



Revisión [Review]

ÁRBOLES Y ARBUSTOS TROPICALES CON POTENCIAL PARA DISMINUIR LA PRODUCCIÓN DE METANO EN RUMIANTES †
[TROPICAL TREES AND SHRUBS WITH POTENTIAL TO REDUCE THE PRODUCTION OF METHANE IN RUMINANTS]

A. A. Sandoval-Pelcastre¹, M. Ramírez-Mella², N. L. Rodríguez-Ávila¹ and B. Candelaria-Martínez^{1*}

¹*Instituto Tecnológico de Chiná, Calle 11 s/n entre 22 y 28. C.P. 24520, Chiná, Campeche, México. Email: aspelcastre@outlook.com, norma_rgzavila@yahoo.com.mx, bcm8003@gmail.com.*

²*CONACYT-Colegio de Postgraduados Campus Campeche. Carretera Haltunchén-Edzná km 17.5. C. P. 24450, Sihochac, Champotón, Campeche, México. Email: monicara@colpos.mx.*

**Corresponding author*

SUMMARY

Background. Worldwide ruminants are an important source of Greenhouse Gases (GHG) as they contribute with around 115 million tons of methane on a yearly basis. Methane is generated by the fermentation of the feed inside the rumen by a microbial consortia constituted by bacteria, archaea, fungi and protozoa. Due to the warming power of methane, which is 28 higher than carbon monoxide, current research focuses on diminishing the emissions of this gas by domestic ruminants. The use of several species of tropical trees and shrubs as a supplement of ruminant feed have resulted ideal within silvopastoral systems. **Objective.** To analyze the current research on trees tropical foliage through the implementation of silvopastoral systems in conventional livestock systems with the aim to diminish GHG generated by ruminal fermentation. **Methodology.** The search of bibliographic information was performed during august 2018 and June 2019 using key terms. **Results.** The results from the diverse research shows that foliage from trees and shrubs located in tropical regions not only increase livestock performance, but also diminish methane synthesis within the rumen due to the action of derived plant secondary metabolites such as condensed tannins, phenolic compounds, essential oils, flavonoids and saponins present in leaves and pods. **Implications.** The information presented in this paper focuses on the use of foliage of tree and shrub species with forage potential in tropical conditions, which have a significant effect on the reduction of methanogenesis in ruminants due to an improvement in nutritional quality of the diet and the presence of secondary metabolites. **Conclusion.** The use of silvopastoral systems with tropical legumes species have the potential of reducing the GHG produced by cattle by 20 up to 38 %.

Key words: Secondary metabolites; global warming; enteric methane; ruminal microbiota.

RESUMEN

Antecedentes. Los rumiantes representan una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, contribuyendo con aproximadamente 115 millones de toneladas de metano al año. Este gas se genera por los procesos fermentativos del alimento en el rumen, llevados a cabo por un consorcio microbiano conformado por bacterias, arqueas, protozoarios y hongos denominado microbiota ruminal. Debido al poder de calentamiento del metano, que es 28 veces mayor que el del dióxido de carbono, la investigación actual se enfoca en disminuir las emisiones de este gas en los rumiantes domésticos. El uso de especies vegetales arbóreas y arbustivas forrajeras tropicales, han resultado ser ideales para la suplementación en la alimentación de los rumiantes a través de la adopción de los sistemas silvopastoriles. **Objetivo.** Analizar la información científica reciente sobre el papel que juegan los follajes de especies arbóreas tropicales a través de la introducción de los sistemas silvopastoriles en los sistemas convencionales ganaderos, para la disminución de gases de efecto invernadero generados por la fermentación ruminal, haciendo posible la reducción de la síntesis de metano entérico. **Metodología.** La búsqueda de información bibliográfica para llevar a cabo esta revisión se realizó durante los meses de agosto 2018 a junio 2019, empleando términos claves. **Resultados.** Los resultados de las investigaciones han demostrado que el follaje de diversos árboles y arbustos presentes en las regiones tropicales no sólo incrementan la productividad del ganado, también disminuyen

† Submitted October 23, 2019 – Accepted March 18, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License.
ISSN: 1870-0462.

la síntesis de metano en el rumen, por acción de los metabolitos secundarios (taninos condensados, compuestos fenólicos, aceites esenciales, flavonoides y saponinas) presentes en hojas y vainas. **Implicaciones.** La información presentada en este artículo se centra en el uso de follajes de especies arbóreas y arbustivas con potencial forrajero en condiciones tropicales, las cuales tienen un efecto significativo sobre la disminución de la metanogénesis en rumiantes debido a una mejora de la calidad nutricional de la dieta y la presencia de metabolitos secundarios. **Conclusiones.** El uso de sistemas silvopastoriles conformados por especies leguminosas tropicales tiene potencial para reducir entre un 20 y 38% la emisión de gases efecto invernadero por ganado bovino.

Palabras clave: Metabolitos secundarios; calentamiento global; metano entérico; microbiota ruminal.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas ambientales que enfrenta el mundo en la actualidad es el cambio climático originado por el calentamiento global, que es ocasionado por la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de actividades antropogénicas (Cardona-Iglesias et al., 2016). De estas actividades, destaca la ganadería, que a nivel mundial es una de las principales fuentes de producción de GEI como resultado de la fermentación entérica de los rumiantes, principalmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) los cuales absorben el calor de los rayos infrarrojos procedentes del sol, contribuyendo al cambio climático (Hristov et al., 2013). Adicionalmente, el 14% de las emisiones antropogénicas de GEI se le atribuye a actividades agrícolas (agricultura y ganadería), sin embargo, los sistemas de producción ganadera contribuyen con aproximadamente el 42% de la producción total de GEI de la agricultura, en donde el 28% de está asociado con las emisiones directas de CH₄ entérico y el 14% de las emisiones indirectas de N₂O relacionadas con el almacenamiento, manejo y su uso como fertilizante del estiércol (Sejian et al., 2015). Cabe señalar que el CH₄ sobresale entre los GEI debido a su mayor producción en comparación al N₂O así mismo el potencial de calentamiento global del CH₄ es 28 veces mayor al del CO₂, mientras que el N₂O es 265 veces mayor que el CO₂ durante un período de 100 años, sin embargo, su producción es mucho menor en contraste con el CH₄. (Panel Intergubernamental de Cambio Climático [IPCC], 2013).

En la búsqueda de soluciones para la disminución de la producción de GEI, la comunidad científica ha evaluado diversas estrategias encaminadas a mejorar la eficiencia de la alimentación animal, buscando incrementar la productividad de los rumiantes y al mismo tiempo reducir las emisiones de CH₄ entérico. En este sentido, en los últimos años se han realizado diversos estudios sobre el uso de metabolitos secundarios de las plantas (MSP) en sustitución de los aditivos químicos, debido a que algunos de ellos modifican la fermentación del rumen, interaccionando con la microbiota ruminal (bacterias, arqueas, protozoarios y hongos) disminuyendo la producción de CH₄ (Vélez-Terranova et al., 2014).

El uso de especies vegetales con potencial antimetanogénico se ha implementado de manera práctica en sistemas silvopastoriles (SSP) que combinan la presencia de gramíneas con especies arbóreas y arbustivas, leguminosas o no leguminosas, en concreto las dietas ofrecidas con *Leucaena leucocephala* integrada a SSP alcanzaron contenidos de PC superiores al 15%, contenidos promedio de FDN y FDA de 50 y 30% respectivamente y una aceptable oferta de minerales como Ca y P, con respecto a las emisiones de metano se determinó 8 % menos de CH₄ por kg⁻¹ de MS consumida, es decir el incremento de la calidad de la dieta forrajera puede contribuir a disminuir las emisiones por kg de MS consumida (Rivera et al., 2015). Sin embargo, dada la gran diversidad de especies vegetales forrajeras presentes en el trópico, aun no se tiene un registro de cuáles tienen efecto sobre la metanogénesis ruminal. Para el estudio de estas especies propias del trópico, resulta necesario realizar evaluaciones del efecto en bioensayos *in vitro*, con el fin de conocer su comportamiento y una posterior corroboración del efecto antimetanogénico *in vivo* (Ortiz et al., 2014).

Por lo anterior, el objetivo del presente documento es recopilar, analizar y sistematizar la información técnica científica disponible en la literatura especializada sobre el potencial de especies arbóreas y arbustivas leguminosas y no leguminosas tropicales, en la reducción de las emisiones de CH₄ entérico, emitido por los rumiantes. Esta revisión bibliográfica se realizó durante los meses de agosto 2018 a junio del 2019, mediante una búsqueda de publicaciones científicas en diversas bases de datos certificadas de la web y revistas electrónicas disponibles en internet como: CSIRO Publishing, Scielo, Revista ciencias CONACYT, NCBI, Scientific Research, Dialnet, DIGITAL.CSIC, Redalyc, Plos/one, BMC, Science direct, National agricultural library, Cambridge Core, Springer, Elsevier, Journal of pharmacognosy and phytochemistry, FAO, Europe PMC, Hindawi. En la búsqueda se incluyeron: artículos científicos, revisiones bibliográficas y capítulos de libro, los cuales estuvieron disponibles al emplear el término de búsqueda en español o su similar en inglés. Dichos términos empleados fueron principalmente: “calentamiento global”, “gases de efecto invernadero”, “metano entérico”, “forrajeras tropicales”, “sistemas silvopastoriles”, “metabolitos secundarios”,

“metanogénesis”, “emisión de gases efecto invernadero por ganadería” y sus combinaciones. La búsqueda se realizó sin restricción de fecha de publicación, pero en su mayoría se eligió el material publicado en los últimos cinco años. Posteriormente, se realizó el estudio y síntesis del material bibliográfico consultado con el fin de puntualizar de la manera más coherente posible el tema central del documento. Se descartaron los documentos desarrollados en regiones no tropicales y con especies distintas a bovinos. En total se localizaron 145 documentos que cumplían con el criterio de la búsqueda, de los cuales se seleccionaron 84 por mayor afinidad al objetivo del trabajo.

CH₄ y el cambio climático

El efecto invernadero es un proceso natural que posibilita la regulación de la temperatura de la atmósfera del planeta, de tal forma que su valor promedio no sea de -6 °C sino de 15 °C. La corteza terrestre retorna la energía que recibe del sol hacia el espacio exterior por medio de la reflexión de la luz y por emisión de calor. No obstante, gran parte de ese calor es retenido por la excesiva y acelerada acumulación de los GEI, desencadenando el calentamiento global (Cardona-Iglesias et al., 2016).

En los últimos cincuenta años, las actividades humanas y la ganadería han propiciado a nivel mundial un incremento acelerado de la temperatura ambiental. Los GEI son unos de los principales agentes del cambio climático global, el cual es considerado uno de los problemas ambientales más críticos de la actualidad (FAO, 2019). Múltiples predicciones de modelos climáticos sugieren que para el año 2100, la temperatura global promedio puede ser de 1.1 a 6.4 °C más cálida que en el 2010 (Sheikh et al., 2017).

La cría de ganado bovino es una fuente importante de emisiones de GEI a nivel mundial. Se estima que anualmente aporta un 18 % del total de GEI de origen antropogénico, a través de las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O producidas por la fermentación entérica y el estiércol (Sejian et al., 2015; Elghandour et al., 2016), los cuales poseen moléculas con dos o más átomos que se mantienen unidos con suficiente espacio entre sí para absorber el calor de la atmósfera y retenerlo (Vélez-Terranova et al., 2014). De estos gases, el CH₄ entérico emitido al medio ambiente como resultado de la fermentación ruminal del alimento, implica una pérdida de la energía digerida del 2 - 12% (Johnson y Johnson, 1995), debido a que utiliza hidrógeno metabólico (H₂) disponible en el rumen en la reducción del CO₂ a CH₄, por acción de las arqueas metanógenas, se traduce en una vía competitiva para la formación de los ácidos grasos volátiles (AGV). Esta variación dependerá de acuerdo a la degradabilidad de la dieta y de la composición química de la misma (Hristov et al.,

2013; Ku-Vera et al., 2013b; Song et al., 2014; Van Lingen et al., 2016). Aunado a esto, el potencial de calentamiento global del CH₄ es de 21 a 25 veces mayor al del CO₂, con un tiempo de vida residual en la atmósfera de 12 años (Wanapat et al., 2015). Por estas características, el CH₄ resulta ser el GEI con mayor impacto en el calentamiento global y, en consecuencia, en el cambio climático.

Rumiantes: emisores de metano entérico

El sector agrícola contribuye con el 60% de las emisiones de CH₄, en donde los sistemas ganaderos aportan el 33%, proveniente principalmente de la digestión mediante la fermentación entérica de los rumiantes (Wanapat et al., 2015), que ocupan el 30% de la superficie terrestre del planeta para el pastoreo, con veinte mil millones de animales (Herrero et al., 2016; Sheikh et al., 2017). El proceso de la fermentación entérica de los rumiantes inicia cuando el animal tiene de 4 a 8 semanas de edad y se encuentra desarrollada su capacidad de rumiar siendo capaces de retener alimentos sólidos en el rumen (Johnson y Johnson, 1995; Morgavi et al., 2013).

El rumen es un ecosistema microbiano anaeróbico en el que una gran mezcla de bacterias, arqueas, protozoarios y hongos transforman la materia orgánica ingerida en energía para el crecimiento microbiano, obteniendo ácidos grasos volátiles (AGV) como producto final de la fermentación (principalmente acetato (Ac), propionato (Pr) y butirato (Bu), que representan más del 95% de la producción total; los alcoholes), alcoholes, H₂ y CO₂. El Ac es el AGV predominante en el rumen y en conjunto con el Bu son fuente de H₂ disponible, mientras que la formación de Pr es una vía para utilizar el H₂ en el rumen, compitiendo por el H₂ implicado en el metabolismo del CH₄. Las arqueas metanógenas usan el H₂ disponible y lo combinan con el CO₂ formando CH₄ y H₂O (Kumar et al., 2014; Song et al., 2014; Wanapat et al., 2015; Van Lingen et al., 2016) así mismo también pueden usar formiato, acetato, metanol, metilaminas (mono, di y trimetilamina) y alcohol (Haque, 2018). Finalmente, el CH₄ acumulado y otros gases volátiles producidos en el rumen son expulsados a través de la boca hacia la atmósfera por medio del eructo, perdiendo en promedio 6% de la energía ingerida como metano eructado (Johnson y Johnson, 1995; Wallace et al., 2015).

La cantidad de CH₄ entérico expulsado por el animal depende de las características de la dieta como tipo de alimento, calidad del forraje, cantidad de energía consumida, tamaño y tasa de crecimiento del animal, así como el nivel de producción y temperatura ambiental, el tipo y talla del animal (Cambrá-López et al., 2008; Cunha et al., 2017). Además de factores externos como el tipo de manejo empleado en el

sistema ganadero y el nivel económico (Cardona-Iglesias et al., 2016; FAO, 2018). Los bovinos adultos producen entre 250 y 600 L de metano por día (Johnson y Johnson, 1995). La producción de CH₄, es una de las principales reacciones de óxido-reducción que se dan mediante la fermentación anaeróbica del rumen, siendo un subproducto de este proceso (FAO, 2018).

Sistemas silvopastoriles (SSP): una alternativa para la mitigación de CH₄ entérico

En las últimas décadas, se ha incrementado la superficie de tierras de cultivo y áreas ganaderas destinadas a potreros, así como la población de animales bovinos, repercutiendo en la reducción de la superficie de bosques y selvas, como consecuencia del aumento en la demanda alimenticia de la población humana; sin embargo, a pesar del incremento del hato ganadero en las regiones tropicales, la producción no ha aumentado (Mauricio et al., 2019). En zonas tropicales y subtropicales, los forrajes consumidos por los rumiantes tienden a tener una calidad nutricional de media a baja (Delgado et al., 2012) y propician que los sistemas ganaderos registren bajos niveles de productividad y competitividad, resultado de la ineficiencia de los sistemas de manejo extensivos de pastizales.

Los forrajes de alta calidad, por ejemplo, de plantas jóvenes, pueden disminuir la producción de CH₄ al alterar la vía de fermentación debido a que contienen mayores cantidades de carbohidratos de fácil fermentación y con menos contenido de FDN, lo que propicia a una mayor digestibilidad y tasa de pasaje. Por su parte, los forrajes más lignificados inducen a una mayor producción de CH₄, por presentar una mayor relación carbono-nitrógeno, lo que disminuye la digestibilidad. Diferentes tipos de forraje también pueden afectar la emisión de CH₄ debido a las diferencias en su composición química (Haque, 2018). Ante este panorama es necesario promover procesos y estrategias que se adapten a las necesidades del sistema convencional ganadero y a las características de cada región (Rivera et al., 2015). Los sistemas de producción animal con suplementación de alimentos verdes provenientes de follajes arbóreos y pastos de buena calidad tienen el potencial de reducir las emisiones de CH₄ por kg de producto animal como resultado del aumento de la digestibilidad de la dieta (Haque, 2018) al incrementarse el contenido de almidón y con la suplementación con forrajes alternativos como los arbustos leguminosos y no leguminosos. De esta forma, se generan también la ocurrencia de cambios en los indicadores nutricionales, con un mejor aprovechamiento de las gramíneas acompañantes, debido al incremento del contenido de proteína y a la reducción de los niveles de

fibra detergente neutro (FDN) (Castro-González, et al., 2008; Hristov et al., 2013; Owen et al., 2012; Roa y Galeano, 2015).

La implementación de los sistemas silvopastoriles (SSP), permiten la integración de recursos vegetales locales con potencial forrajero con la producción animal, incorporándolos en la alimentación de los rumiantes y desarrollando sistemas más eficientes con menor impacto sobre el equilibrio ecológico de las regiones. Puede coadyuvar a mejorar los parámetros productivos y la calidad de los productos obtenidos en los sistemas ganaderos. Los SSP se consideran una alternativa sostenible para aumentar la cantidad y calidad del forraje, promover el bienestar animal y diversificar los ingresos agrícolas (Mauricio et al., 2019). Además, la presencia de metabolitos secundarios tales como taninos condensados y saponinas, en el follaje de las especies arbóreas y arbustivas forrajeras pueden modificar la fermentación ruminal, contribuyendo a una disminución en las emisiones de CH₄ (Patra y Saxena, 2009; Mao et al., 2010; Delgado et al., 2012; Ku-Vera et al., 2014). Se ha demostrado que los taninos, comunes en las leguminosas tropicales, reducen la producción de CH₄ al reducir la digestión de las fibras, inhibir la unión con proteínas y, por tanto, ralentizan la degradación de la proteína vegetal en el rumen causando la inhibición directa del crecimiento de metanógenos (Meale et al., 2012).

La inclusión de 25% de *Leucaena leucocephala* en dietas de bovinos basadas con gramíneas, como por ejemplo *Cynodon plectostachyus* disminuye 15% de la emisión de CH₄ por kilogramo de materia seca consumida; es decir que al incluir leguminosas en mezclas con gramíneas se mejora la digestibilidad de la materia seca hasta un 18% (Molina et al., 2015). Asimismo, el follaje de plantas tropicales como *L. leucocephala*, *Samanea saman*, *Sapindus saponaria*, *Albizia lebeck* y *Tithonia diversifolia*, entre otras, influyen en la reducción de emisiones GEI, particularmente de CH₄ en sistemas bovinos (Molina et al., 2015; Rivera et al., 2015; Rivera et al., 2016).

Efecto de los metabolitos secundarios presentes en los forrajes arbóreos y arbustivos sobre la disminución de la metanogénesis ruminal

Bodas et al. (2012) indica que gran parte de las plantas contienen diversos compuestos orgánicos clasificados en metabolitos primarios (MP) como son los necesarios para el crecimiento, desarrollo y reproducción de las plantas; y metabolitos secundarios (MSP), entre los que destacan los involucrados en la respuesta de defensa vegetal que actúa en la presencia de microorganismos patógenos, depredación de insectos o herbívoros y los relacionados con los mecanismos de reproducción, al interactuar las plantas con su entorno

despidiendo olores o colores para atraer organismos que polinicen o dispersen sus semillas. La presencia y concentración de MSP puede cambiar dependiendo de la especie, así mismo varían de acuerdo a la edad de la planta y factores ambientales (Wallace, 2004; Pavarini et al., 2012; Marienhagen y Bott, 2013).

La suplementación con forrajes de árboles y arbustos leguminosos y no leguminosos, para mejorar la calidad de la dieta, tiene potencial para reducir las emisiones de CH₄ por unidad de producto animal (carne o leche), debido a que conducen a una mayor digestibilidad al presentar un bajo contenido de fibra lo que se traduce en una tasa de paso rápida. Asimismo, la manipulación de la metanogénesis puede lograrse mediante la inhibición directa de los metanógenos, con la consecuente reducción en la producción de hidrógeno en el rumen o el suministro de sumideros alternativos para la eliminación del hidrógeno (Beauchemin et al., 2009; Wanapat et al., 2015). En general, los pastos C4 producen más CH₄ que las plantas C3 (Haque, 2018). Se ha demostrado que los compuestos secundarios presentes en las plantas (taninos condensados, saponinas y flavonoides) reducen las emisiones de CH₄ entérico a través de la inhibición de los metanógenos, por lo que son aditivos importantes para la alimentación de rumiantes constituyendo una estrategia sustentable para la mitigación del CH₄ debido a su origen natural, en contraste a los aditivos químicos. Asimismo, la inclusión de alimentos con alto contenido de almidón (como los forrajes o concentrados) favorecen la producción de propionato, que afecta a la metanogénesis a través de la competencia reducida por el H₂ (Cieslak et al., 2013) y reducen el pH ruminal, inhibiendo así el crecimiento y/o la actividad de metanógenos, protozoarios (Meale et al., 2012) y de las bacterias celulolíticas.

Los MSP se agrupan de acuerdo con el compuesto químico que los constituyen y entre los principales grupos asociados a la reducción de CH₄ entérico se encuentran las saponinas, los taninos y los flavonoides; su efecto dependerá del compuesto bioactivo, su concentración, la dieta en la que se adiciona, la especie animal, la composición química de la planta y del pH del rumen (Pavarini et al., 2012; Patra y Saxena, 2009). Los MSP, particularmente, los taninos, las saponinas y flavonoides tienen la capacidad de inhibir la metanogénesis actuando sobre la población de protozoarios ciliados y la población o actividad de las arqueas metanógenas, modificando los patrones de fermentación en el rumen. En dosis moderadas, los MSP reducen la producción de CH₄ sin afectar la fermentación; sin embargo, en dosis altas, algunos metabolitos suelen inhibir casi en su totalidad la fermentación ruminal, teniendo un impacto negativo en la tasa de fermentación, la dinámica ruminal y en la digestibilidad del alimento (Vélez et al., 2017; Vélez-Terranova et al., 2014).

Saponinas. Se ha reportado que el extracto de *Yucca schidigera* (con un contenido entre el 8 y 10% de saponinas) a dosis altas de 13.8 g kg⁻¹ de Materia Seca (MS) presentó una disminución no significativa del 11.7% en la liberación de CH₄ en ovejas (Patra y Saxena, 2010); no obstante, en vacas suplementadas con harina de planta completa de *Y. schidigera* o harina de *Quillaja saponaria*, las cuales presentan alto contenido de saponinas y que en estudios previos *in vitro* condujeron a disminuciones de CH₄ a niveles de inclusión altos (15 g kg⁻¹ de MS), en los ensayos *in vivo* con novillas cuya alimentación fue suplementada con dosis moderadas a bajas para minimizar los posibles efectos sobre la digestibilidad (Holtshausen et al., 2009; Hook et al., 2010), no se obtuvo la misma respuesta inhibitoria de la metanogénesis (≤ 5.8 g kg⁻¹ de MS) (Hristov et al., 2003).

Se ha reportado que el follaje de plantas tropicales con altos contenidos de saponinas, tienen la capacidad de disminuir la población de protozoarios en el rumen, los cuales tienen una actividad fibrolítica importante (Bodas et al., 2012). Las saponinas también limitan la disponibilidad de H₂ para la metanogénesis (Hook et al., 2010), esta disminución de H₂ favorece a una mayor producción de propionato, ya que se disminuye la relación acetato:propionato, mejorando la productividad de los rumiantes (Patra y Saxena, 2010). De la misma manera, la ingesta se fermenta en menor medida en el rumen con una fermentación más extensa en el intestino posterior, donde el H₂ se elimina por otras rutas metabólicas distintas de la metanogénesis, como la acetogénesis (Bodas et al., 2012; Leng, 2014). El modo de acción de las saponinas consiste en interactuar con el colesterol presente en la membrana de los protozoarios causando su rompimiento y deteriorándola hasta que finalmente se desintegra causando la defaunación. Por tanto, disminuye la metanogénesis debido a que, en el rumen, los protozoarios se encuentran asociados a las arqueas metanogénicas y su relación puede generar entre el 9 y el 37% de las emisiones totales del CH₄ entérico producido por los rumiantes (Vargas et al., 2011; Vélez-Terranova et al., 2014).

Taninos. Los taninos son compuestos antimicrobianos, que inhiben algunos microorganismos ruminales, tales como los protozoarios. Afectan indirectamente a arqueas metanógenas a través de actividades bactericidas o bacteriostáticas, reaccionando con iones de calcio de la pared celular, causando un cambio en su permeabilidad y permitiendo la penetración de estos compuestos, con lo que se inactivan permeasas del periplasma involucradas en el transporte de aminoácidos y carbohidratos. Estos MSP alteran el metabolismo microbiano mediante inactivación enzimática, formando complejos con las proteínas, aminoácidos y

polisacáridos (Ortiz et al., 2014). Los taninos se dividen en dos principales grupos: los taninos hidrolizables (TH), los cuales son esterificados parcialmente por un grupo fenólico, como el ácido gálico; y los taninos condensados (TC) o proantocianidinas (Patra y Yu, 2013; Vélez-Terranova et al., 2014; Patra y Saxena, 2011), afectando negativamente a las bacterias celulolíticas y en consecuencia, la fermentación anaeróbica de carbohidratos a AGV's, en particular acetato, reduciendo así la formación de CO₂ y H₂ necesaria para la metanogénesis (Patra y Saxena, 2009).

Los TC disminuyen la producción de CH₄ a través de la inhibición de la degradación de la fibra (efecto indirecto), mientras que los TH parecen actuar mediante la inhibición de los microbios productores de metanógenos o del H₂ (efecto directo). Los taninos pueden reducir la degradabilidad de la proteína ruminal y la digestión de la pared celular de la planta porque se unen a proteínas dietéticas y polisacáridos estructurales como la celulosa, hemicelulosas y pectina, lo que reduce su tasa de digestión, lo que dependerá de la concentración del MSP (Bodas et al., 2012; Kumar et al., 2014). La producción de metano se redujo (hasta un 55%) cuando los rumiantes fueron alimentados con forrajes ricos en taninos, como la alfalfa y el loto (Haque, 2018; Hook et al., 2010). Concentraciones entre 2–4% MS brinda beneficios sobre el metabolismo proteico, reduciendo la degradación a nivel ruminal y aumentando el flujo de aminoácidos que pueden ser absorbidos en el intestino delgado e incrementando el rendimiento animal sin afectar el consumo de alimento. Sin embargo, en niveles de inclusión superiores al 6%, se reduce el consumo de alimento, la tasa de digestión ruminal y la productividad (Vélez-Terranova et al., 2014).

En la última década diversos estudios indican que la suplementación de las dietas con TC puede alterar la diversidad de metanógenos ruminales sin afectar el número total de los mismos, aunque en otros estudios no se reporta ningún cambio considerable (Staerfl et al., 2012). Por su parte, Andrade-Rivero et al. (2012), sugirieron que una dosis del 2% de TC de la especie *Schinopsis balansae*, inhibe el crecimiento microbiano y una dosis superior al 3% es letal para los microorganismos ruminales. Igualmente, la adición de extractos de follajes de *Acacia cornigera*, *Albizia lebeccoides* y *Leucaena leucocephala*, conteniendo TC, adicionados en un 30% a dietas a base de *Pennisetum purpureum* mostraron una reducción en la metanogénesis y de la población de *Ruminococcus albus*. En adición, se reportó un aumento en la producción de propionato y una mejora en la eficiencia de la utilización de energía (Rodríguez et al., 2011). No obstante, los TC presentes en *Havardia albicans*, *Acacia pennatula* y *Bursera simaruba* incorporados al

30% en la dieta, no afectaron la metanogénesis. Sin embargo, concentraciones de TC de entre 2 y 3% de la MS en la alimentación de novillas resultó en una reducción del 31% y 47% de la pérdida de energía en forma de metano, sin afectar el consumo de MS y MO, aunque su digestibilidad se vio comprometida (Piñeiro-Vázquez et al., 2017).

Flavonoides. Los flavonoides tienen diferentes funciones en las plantas, tales como la regulación del metabolismo primario (Bodas et al., 2012). Las plantas que tienen un alto contenido de flavonoides disminuyen la producción de metano e inducen a una estimulación extensa del metabolismo microbiano, que aumenta tanto la degradabilidad de la proteína cruda como los constituyentes de la pared celular, al mejorar la fermentación hasta de un 50%. Estos MSP promueven la defaunación afectando la función de la membrana citoplásmica, mediante la inhibición de la síntesis de la pared celular bacteriana y de los ácidos nucleicos (Vélez-Terranova et al., 2014; Lakhani y Lakhani, 2018; Rivera et al., 2018).

Se ha encontrado que la resina natural que se encuentra en la nuez de *Anacardium occidentale* mitiga la producción de CH₄ en el rumen (Bodas, et al., 2012). De igual manera, el efecto de la inclusión del follaje de *L. officinalis* y *E. arvense* (las cuales tienen un alto contenido de flavonoides) mejoró la tasa de fermentación *in vitro* en un 50%, a través de un aumento en la liberación de acetato y propionato, reduciendo de esta forma la producción de CH₄ (Vélez-Terranova et al., 2014). Por otro lado, un extracto de plantas que contenía flavonoides a una concentración de 300 mg kg⁻¹ de MS, fue capaz de disminuir la incidencia de acidosis y mejorar el rendimiento en el ganado (Oskoueian et al., 2013).

Contenido de metabolitos secundarios en árboles y arbustos forrajeros

Por tanto, la implementación de forrajes que contengan MS para su uso como aditivos en dietas orientadas a la inhibición de la emisión de CH₄ y la mejora de la eficiencia animal, presentan diversos beneficios, ya que se encuentran de forma natural en la vegetación local siendo algunos de éstos usados frecuentemente por los productores como forrajes en época de estiaje. Además, son más seguros que los aditivos químicos sintéticos ya que no se ha reportado la residualidad de estos compuestos en los productos finales (carne o leche) (Ku-Vera et al., 2013a). Diversos trabajos se han enfocado a evaluar el potencial de los MSP para inhibir la emisión de metano usando una amplia variedad de plantas en diferentes regiones del mundo. Para la región sureste de México, se ha reportado el uso de 53 especies de plantas dentro de los sistemas silvopastoriles (Nahed-Toral et al., 2013). Por otro lado, Ku-Vera et al. (2013a) evidenció el potencial de

50 especies ricas en taninos y saponinas para mitigar CH₄, con una reducción de las emisiones de la fermentación ruminal en bovinos desde un 25% hasta más del 90%, teniendo un efecto notable en la población de protozoarios ciliados (Patra et al., 2006; Kumar et al., 2011). Asimismo, en dietas para borregos con 3 % de suplementación de *Enterolobium cyclocarpum* se redujo en un 36% la producción de CH₄ entérico y una disminución en la población total de protozoarios; sin embargo, estos efectos son influenciados por el consumo y digestibilidad de la materia orgánica, y la fibra detergente neutro del alimento (Albores-Moreno et al., 2017; Ku vera et al., 2013b).

Así, se han reportado diversas especies arbóreas y arbustivas tropicales con presencia de metabolitos secundarios ideales para ser empleadas en la

alimentación de rumiantes. En la Tabla 1 se señalan algunas de éstas descritas en estudios de 2015 a 2019.

Con base en los datos presentados en la Tabla 2, entre las especies tropicales que presentan mayor contenido de TC se encuentran *Lysiloma latisiliquum* (16.14%) (Pech-Cervantes, et al., 2016), *Bauhinia divaricata* (12.75 %) (Gómez-Fuentes-Galindo et al., 2017), *Samanea saman* (12.1%) (Delgado et al., 2014; Salazar et al., 2018), *Guazuma ulmifolia* (4.71%) (Cardona-Iglesias et al., 2016), *Leucaena leucocephala* (1.65%) (Ortiz-Domínguez et al., 2014) y *Moringa oleifera* (1.2%) (Cardona-Iglesias et al., 2016) y se presentan en menor porcentaje en *Brosimum alicastrum* (0.42%) (Rojas-Schroeder et al., 2017) y *Gliricidia sepium* (0.3%) (La O et al., 2018). El resto de las especies descritas no presentan TC.

Tabla 1. Contenido de Metabolitos secundarios presentes en especies arbóreas y arbustivas.

Especie	%			Presencia/Ausencia			Referencia
	TC	FT	SP	TC	FT	SP	
<i>Bauhinia divaricata</i>	12.75	ND	ND	(-)	(-)	(+)	Gómez-Fuentes-Galindo et al. (2017)
<i>Muntingia calabura</i>	6.19	22.28	ND	(-)	(-)	(-)	Gonzales et al. (2007)
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	16.14	1.5	ND	(-)	(-)	(-)	Pech-Cervantes et al. (2016)
<i>Sida acuta</i>	2.87	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Gómez-Fuentes-Galindo et al. (2017)
<i>Guazuma ulmifolia</i>	4.71	2.8	ND	(++)	(-)	(+)	Cardona-Iglesias et al. (2016).
<i>Moringa oleifera</i>	1.2	4.4	8.1	(++)	(-)	(+)	Cardona-Iglesias et al. (2016).
<i>Samanea saman</i>	12.1	ND	15.7	(+)	(-)	(+)	Delgado et al. (2014); Salazar et al. (2018).
<i>Gliricidia sepium</i>	0.3	ND	ND	(+)	(-)	(++)	La O et al. (2018).
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	ND	ND	ND	(+++)	(-)	(++)	Cardona-Iglesias et al. (2016).
<i>Brassica napus</i>	ND	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Espinoza-Canales et al. (2017).
<i>Tithonia diversifolia</i>	ND	30.48	ND	(++)	(-)	(+)	Cardona-Iglesias et al. (2016); Rivera et al. (2018).
<i>Azadirachta indica</i>	ND	ND	ND	(+++)	(+)	(+)	Galindo et al. (2014).
<i>Cassia fistula</i>	ND	ND	ND	(-)	(+++)	(-)	Apráez et al. (2017).
<i>Senna racemosa</i>	ND	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Cab-Jiménez et al. (2015).
<i>Brosimum alicastrum</i>	0.42	3.8	ND	(-)	(-)	(-)	Rojas-Schroeder et al. (2017).
<i>Pithecellobium dulce</i>	ND	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Apráez et al. (2017).
<i>Bursera epinnata</i>	ND	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Guerrero-Cárdenas et al. (2018)
<i>Acer campestre</i>	ND	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Vandermeulen et al. (2016)
<i>Prosopis glandulosa</i>	ND	ND	ND	(-)	(-)	(-)	Whitney et al. (2017)
<i>Leucaena leucocephala</i>	1.65	3.72	ND	(-)	(-)	(-)	Ortiz-Domínguez et al. (2014)

ND: no determinado, TC: Taninos condensados; FT: Fenoles totales; SP; Saponinas; presencia del metabolito; (+++) alto, (++) moderado, (+) bajo y (-) no hay presencia. Se presenta un listado de especies arbóreas y arbustivas evaluadas en diferentes estudios por su presencia de metabolitos secundarios, la información se presenta en dos secciones, en la primera se muestra la cantidad (%) del metabolito secundario y en la segunda parte se describe la intensidad de la presencia/ausencia de acuerdo con lo reportado en cada trabajo revisado.

Se ha reportado que *L. latisiliquum*, al presentar altos contenidos de TC propicia que se reduzca la tasa de fermentación y ocasiona un efecto de llenado del rumen; en situaciones más severas, reduce la digestión de la fibra y del nitrógeno y la digestibilidad de las células de la pared, al adherirse a enzimas bacterianas o formar complejos indigestibles con carbohidratos estructurales (Pech-Cervantes et al., 2016). Por otro lado, el estudio de Gómez-Fuentes-Galindo et al. (2017) concluyó que *B. divaricata* induce a la mitigación en la producción de metano entérico, al modificar las poblaciones microbianas en el rumen y, como consecuencia, cambiar los productos de la fermentación (ácidos acético, propiónico y butírico) de los carbohidratos del rumen. Por su parte, *S. saman* y *G. ulmifolia* presentaron un efecto negativo en el consumo voluntario, la digestión de nutrientes y la respuesta animal; sin embargo, al contener altos niveles de saponinas reducen las emisiones entéricas de metano y actúan sobre parásitos gastrointestinales (Delgado et al., 2014; Cardona-Iglesias et al., 2016). En cuanto a *L. leucocephala*, se determinó que mejora la composición de los microorganismos celulíticos, por lo que favorece una mayor degradación ruminal de la celulosa y ofrece a los animales la cantidad de azúcares necesarios para su metabolismo (Ortiz-Domínguez et al., 2014). Mientras tanto, *M. oleifera* en combinación con *Cynodon plectostachyus* reduce la metanogénesis debido a los efectos directos de los taninos sobre la actividad de los metanógenos.

Con respecto a los FT, las especies más sobresalientes fueron; *Tithonia diversifolia* (30.48%) (Cardona-Iglesias et al., 2016; Rivera et al., 2018), *Muntingia calabura* (22.28%) (Gonzales et al., 2007), *Moringa oleifera* (4.4%) (Cardona-Iglesias et al., 2016), *Brosimum alicastrum* con (3.80%) (Rojas-Schroeder et al., 2017), *Leucaena leucocephala* (3.72%) (Ortiz-Domínguez et al., 2014), *Guazuma ulmifolia* (2.8%)(Cardona-Iglesias et al., 2016), *Lysiloma latisiliquum* (1.5%) (Pech-Cervantes et al., 2016) mientras que para el resto de las especies no se determinó el porcentaje de dichos MSP en los estudios revisados. Para *T. diversifolia* se determinó que los FT que contiene pueden modificar las poblaciones microbianas a nivel del rumen sin afectar la digestibilidad y aprovechamiento de los nutrientes en la dieta (Cardona-Iglesias et al., 2016; Rivera et al., 2018). *B. alicastrum*, por su parte, reduce la población de microorganismos viables y proteolíticos totales en el rumen; no hay reportes sobre algún efecto anti nutricional ocasionado por alguna sustancia proveniente de esta especie (Rojas-Schroeder et al., 2017). Los FT presentes en *M. calabura* en altas concentraciones reducen la producción de metano y también estimulan el metabolismo microbial (Gonzales et al., 2007; Patra y Saxena, 2010).

La presencia de saponinas solo se reportó en *Samanea saman* (15.7%) (Delgado et al., 2014; Salazar et al., 2018) y *Moringa oleifera* (8.1%) (Cardona-Iglesias et al., 2016). Para ambas especies se ha reportado que dosis altas (mayores a 0.4 g l⁻¹) de saponinas disminuyen la metanogénesis, como consecuencia de una menor digestibilidad de la dieta, la cual es ocasionada por la inhibición del crecimiento microbiano incluyendo las bacterias celulolíticas y hongos. Mientras que en dosis bajas a partir de la inclusión de 0.2 g l⁻¹ de saponinas se redujo la producción de metano sin afectar la digestibilidad (Delgado et al., 2014).

Con respecto a la abundancia global de los metabolitos secundarios descritos, en los trabajos revisados se encontró que para los TC existe una alta presencia (+++) en las especies de *Enterolobium cyclocarpum* (Cardona-Iglesias et al., 2016) y *Azadirachta indica* (Galindo et al., 2014). Sin embargo, *Guazuma ulmifolia*, *Moringa oleifera* y *Tithonia diversifolia* resultaron tener una presencia moderada de este metabolito (++) (Cardona-Iglesias et al., 2016; Rivera et al., 2018), mientras que en las especies *Samanea saman* y *Gliricidia sepium* se reportó una baja presencia (+) de éstos (Delgado et al., 2014; Salazar et al., 2018; La O et al., 2018). Finalmente, no se reportó la presencia de TC para el resto de las especies.

Por otro lado, se ha reportado que *E. cyclocarpum*, presenta una alta concentración de TC y aumenta la población microbiana total, así como la cantidad de organismos celulolíticos mientras que para *A. indica* se ha determinado que el material vegetal que presente TC tanto en dosis altas como en moderadas, tal y como otras especies que presentan estos metabolitos en dosis moderadas, se puede emplear para reducir la población de protozoos y la metanogénesis ruminal (Galindo et al., 2014). Para las especies que presentan baja presencia de TC, los estudios realizados sugieren que pueden aumentar la población de organismos celulolíticos, lo que favorece la degradación de los materiales fibrosos en el rumen (Delgado et al., 2014). En cuanto a los FT, se reporta una alta presencia (+++) para la especie *Cassia fistula* (Apráez et al., 2017) y una baja presencia (+) en *Azadirachta indica* (Galindo et al., 2014); para el resto de las especies no se reportó la presencia de este metabolito secundario. Para *C. fistula* se reporta que un efecto antinutricional sobre la degradabilidad de su follaje (Apráez et al., 2017), mientras que *A. indica* resultó tener efectos en la reducción de la producción de metano y estratégicamente, por la presencia de este grupo de metabolitos, resulta ser útil como aditivo en las dietas de rumiantes (Galindo et al., 2014). Respecto a las SP se encontró una presencia moderada (++) en las especies de *Gliricidia sepium* (La O et al., 2018) y *Enterolobium cyclocarpum* (Cardona-Iglesias et al., 2016), mientras que para *Bauhinia divaricata*,

Guazuma ulmifolia, *Moringa oleifera*, *Samanea saman*, *Tithonia diversifolia* y *Azadirachta indica* se encontró una baja presencia (+) de estos metabolitos (Gómez-Fuentes-Galindo et al., 2017; Cardona-Iglesias et al., 2016; Delgado et al., 2014; Salazar et al., 2018; Galindo et al., 2014; Rivera, et al., 2018). Para el resto de las especies no se reportó presencia de este metabolito secundario.

Composición química-nutricional de especies forrajeras con potencial antimetanogénico

El empleo de especies forrajeras en sistemas pecuarios, tanto de pastoreo como de corte y acarreo, ha resultado ser de gran importancia en los últimos años dada su contribución a mejorar la alimentación y producción del ganado, así como para disminuir las emisiones de CH₄. En este sentido se ha propuesto que el uso de alimentos verdes provenientes de follajes arbóreos y pastos de buena calidad nutricional son una opción viable de suplementación con mayor posibilidad de introducción a los sistemas tradicionales de producción ganadera (Owen et al., 2012).

El uso de concentrados ricos en carbohidratos no estructurales (azúcares, almidón) con concentraciones superiores al 35% de la dieta, provoca una reducción en la producción e intensidad de emisión de CH₄, al reducirse las fuentes de hidrógeno en el rumen. Al mismo tiempo, se incrementa el consumo y la degradación del alimento, el flujo ruminal del alimento y se hace más eficiente la captura de hidrógeno a través de un incremento en la producción de ácido propiónico. No obstante, se ha reportado que proporciones más elevadas de carbohidratos no estructurales, propician un incremento de la emisión de CH₄ vía estiércol y se puede comprometer la digestibilidad de la fibra en la dieta (Sejian et al., 2015; Gómez-Fuentes-Galindo et al., 2017).

Especies como *Leucaena leucocephala*, *Tithonia diversifolia*, *Gliricidia sepium* y *Guazuma ulmifolia*, por mencionar algunas, han demostrado mejorar la alimentación animal en condiciones tropicales y subtropicales. Un claro ejemplo se demuestra con *T. diversifolia*, la cual contiene bajos valores de Fibra detergente ácida (FDA) y Fibra detergente neutro (FDN), considerables porcentajes de degradación y contenido de carbohidratos no estructurales. Dichas características varían el balance de nutrientes de las dietas ofrecidas y también modifican la dinámica fermentativa y de degradación de forma física y química, por tanto, resulta ser una planta apta para ser ofertada en dietas para animales (Rivera et al., 2018). En la Tabla 2 se presenta un análisis de la composición química de las especies forrajeras tropicales más utilizadas en la ganadería y en estudios recientes.

Efecto de los sistemas silvopastoriles sobre la disminución de gases efecto invernadero

Sistemas silvopastoriles son agroecosistemas en los que se asocia un componente arbóreo con uno herbáceo y el ganado en un mismo sitio, donde existen interacciones biológicas entre estos y se maximiza el uso de la tierra (Russo, 2015). Los sistemas silvopastoriles contribuyen a la adaptación al cambio climático por los efectos reguladores de los árboles sobre la temperatura del aire y evitando la desecación de los pastos y mejorando el bienestar animal. También pueden contribuir a la mitigación del cambio climático con un balance positivo de la emisión de gases efecto invernadero. El incremento de la digestibilidad del forraje presente en los sistemas silvopastoriles es considerado como el principal factor para disminuir la emisión de estos gases (Naranjo et al., 2012). Al respecto Jiménez reporta valores de emisión de CH₄ de 0.196 y 0.174 en bovinos que pastorearon praderas de pasto *Brachiaria brizantha* y *B. brizanta* asociado con *Leucaena leucocephala* respectivamente. Por su parte Montenegro y Abarca (2002) evaluaron el balance entre la fijación de C atmosférico y la emisión de CO₂, N₂O y CH₄ en tres modelos de sistemas silvopastoriles consistentes en sucesiones secundarias de bosque montano bajo con asocio de pasto kikuyo (*P. clandestinum*), bosque premontano muy húmedo con asocio de pasto estrella de África (*C. nlemfuensis*) y bosque húmedo tropical con asocio de pasto ratana (*I. indicum*). Los resultados arrojaron un balance positivo de gases de efecto invernadero en los tres sistemas evaluados, dicha emisión fue menor en el sistema ubicado en el bosque húmedo tropical, seguido de bosque montano bajo y bosque premontano muy húmedo con valores de 418; 2,418 y 3,911 kg ha⁻¹ año⁻¹, al respecto los autores resaltan que la implementación de estrategias de manejo y suplementación aunadas al uso de los sistemas silvopastoriles puede disminuir aún más la emisión de gases. Por su parte Naranjo et al. (2012), mencionan que los sistemas silvopastoriles asociados con *Leucaena leucocephala* pueden disminuir hasta en un 30% la emisión de CH₄ por kg de MS consumido, y las emisiones por animal pueden disminuir hasta en un 38%. En este mismo sentido Archimede et al. (2011) y Rivera et al. (2017) mencionan que el uso de este tipo de sistemas que contemplen la presencia de leguminosas tropicales puede contribuir a una disminución de hasta en un 20% las emisiones de CH₄ por kilogramo de carne o leche producido, y por kilogramo de materia seca consumida por bovinos, en comparación con el pastoreo en praderas de gramíneas.

Tabla 2. Composición química de especies arbóreas y arbustivas tropicales.

Especie	Tejido vegetal	MS	MO	DIV MS	CEN	FDN	FDA	PC	LG	EE	Referencia
<i>Bauhinia divaricata</i>	Follaje	ND	ND	65.93	7.9	64.3	42.1	18.2	9.7	ND	Gómez-Fuentes-Galindo et al. (2017)
<i>Muntingia calabura</i>	Follaje	ND	88.56	ND	11.44	70.11	45.93	15.07	ND	ND	Gonzales et al. (2007)
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	Follaje	ND	ND	ND	5.82	50.73	43.91	14.08	28.17	ND	Pech-Cervantes et al. (2016); Ortiz-Domínguez et al. (2014)
<i>Sida acuta</i>	Follaje	ND	ND	ND	ND	43.68	ND	15.24	ND	ND	Gómez-Fuentes-Galindo et al. (2017)
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Follaje	59.7	ND	53.8	11.3	49.9	31.9	17.33	13.3	6.37	Mayren-Mendoza et al. (2018).
<i>Samanea saman</i>	Follaje	35.9	ND	30	ND	61.4	40.9	20.7	15.9	9.72	Delgado et al. (2014) Salazar et al. (2018)
<i>Gliricidia sepium</i>	Follaje	22.1	87.33	76.21	11.41	36.32	19.51	24.79	0.16	ND	La O et al. (2018)
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	Semillas y follaje	ND	ND	ND	4.13	28.38	20.4	19.5	ND	ND	Hernández-Morales et al. (2018).
<i>Brassica napus</i>	Follaje	ND	82.17	67.22	17.83	47.09	27.83	26.32	ND	ND	Espinoza-Canales et al. (2017)
<i>Bauhinia variegata</i>	Follaje	21.9	91.78	ND	9.21	61.5	46.22	16.54	ND	2.32	Mandal y Gautam (2012)
<i>Tithonia diversifolia</i>	Follaje	84.4	ND	ND	14.24	43.4	29	17	5.7	ND	Rivera et al. (2018).
<i>Pithecellobium acatlense</i>	Hoja y vaina	ND	90.9	ND	9.1	34.9	22.5	14.8	5.4	ND	Hernández et al. (2015).
<i>Amelanchir denticulada</i>	Hoja	ND	91.1	ND	8.9	30.9	17.7	13.1	6.4	ND	Hernández et al. (2015)
<i>Azadirachta indica</i>	Hoja, peciolo y vaina	ND	ND	ND	3.92	41	28.92	14.25	ND	ND	Galindo et al. (2014).
<i>Cassia fistula</i>	Follaje	45.3	ND	ND	6.31	33.8	24.2	16	7.78	4.52	Apráez et al. (2017)
<i>Senna racemosa</i>	Follaje	ND	ND	ND	4.7	62.5	27.3	19.5	9.1	ND	Cab-Jiménez et al. (2015)
<i>Brosimum alicastrum</i>	Follaje	42.5	88.25	ND	ND	51.9	ND	14.8	6.8	ND	Rojas-Schroeder et al., (2017).
<i>Pithecellobium dulce</i>	Follaje	35	ND	ND	8.55	49.3	31.3	18.2	11.4	5.62	Apráez et al. (2017)
<i>Bursera epinnata</i>	Follaje	ND	ND	56.8	6.8	47.3	41.2	10.9	ND	4.3	Guerrero-Cárdenas et al. (2018)
<i>Acer campestre</i>	Follaje	ND	90.5	ND	ND	32.3	10.1	19.4	6	ND	Vandermeulen et al. (2016)
<i>Prosopis glandulosa</i>	Follaje	ND	ND	20.9	4.3	74.7	57.8	5.7	17.9	ND	Whitney et al. (2017)
<i>Leucaena leucocephala</i>	Follaje	ND	ND	ND	5.32	49.70	37.11	19.02	11.58	2.71	Ortiz-Domínguez et al. (2014)

ND: No determinado, MS: Materia seca, MO: Materia orgánica, DIVMS: Digestibilidad *in vitro* de materia seca, CEN: Ceniza, FDN: Fibra Detergente Neutro, FDA: Fibra Detergente Ácida, PC: Proteína cruda, LG: Lignina EE: Extracto etéreo. Todos los valores son reportados en porcentaje.

CONCLUSIÓN

Actualmente, a nivel mundial el calentamiento global y su impacto sobre los procesos biológicos es un hecho tangible. La ganadería es la principal actividad agropecuaria generadora de GEI responsables del calentamiento global. De acuerdo con los reportes considerados en el presente documento, se evidencia

un efecto positivo de las especies arbóreas y arbustivas tropicales a través de la presencia de metabolitos secundarios sobre la reducción de la emisión neta de metano por parte de rumiantes mediante modificaciones del metabolismo ruminal. Los sistemas silvopastoriles constituyen una estrategia integral para poder ofertar de manera práctica el follaje de estas especies no gramíneas a los rumiantes y pueden

disminuir entre un 20 y 38 % la emisión de GEI, dependiendo de las condiciones en las que se desarrolla el sistema y el manejo implementado. Es importante realizar estudios integrales de rumiantes mantenidos en sistemas silvopastoriles multiasociado y correlacionar diversas variables como calidad del forraje, microclima, bienestar animal, consumo voluntario, bienestar animal, dinámica de los microorganismos ruminales, parámetros productivos y emisión de metano, para conocer el efecto real y su aplicación de manera práctica en los sistemas ganaderos tropicales.

Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT-México) por la beca de maestría otorgada al primer autor y por el financiamiento de la investigación.

Financiamiento. Proyecto 417 "Análisis transcriptómico de la microbiota ruminal de bovinos alimentados con forrajes tropicales y su correlación con la producción de gases de efecto invernadero" de la Convocatoria Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales, 2015, del CONACYT.

Conflicto de interés. Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Cumplimiento de normas éticas. Debido a la naturaleza del trabajo (revisión), los autores no tienen nada que declarar.

Disponibilidad de datos. Los datos están disponibles con el Dr. Bernardino Candelaria Martínez, *bcm8003@gmail.com*, a solicitud razonable.

REFERENCIAS

- Albores-Moreno, S., Alayón-Gamboa, J.A., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Aguilar-Pérez, C.F., Olivera-Castillo, L., Ku-Vera, J.C. 2017. Effects of feeding ground pods of *Enterolobium cyclocarpum* jacq. griseb on dry matter intake, rumen fermentation, and enteric methane production by pelibuey sheep fed tropical grass. *Tropical Animal Health and Production*. 49(4):857-866. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11250-017-1275-y>.
- Andrade-Rivero, E., Martínez-Campos, A.R., Castelán-Ortega, O.A. 2012. Producción de metano utilizando plantas taníferas como sustrato en fermentación ruminal *in vitro* y efecto de extractos fenólicos en la microflora ruminal. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 15:301-312.
- Apráez, G., Gálvez, C., Leonel, A., Navia, E., Fernando, J. 2017. Nutritional assessment of trees and shrubs of a tropical (bms-T) very dry forest for cattle production. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 34(1):98-107. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173401.66>.
- Archimede, H., Eugene, M., Marie, M.C., Boval, M., Martin, C., Morgavi, D. P., Lecomte, P. y Doreau, M. 2011. Comparison of methane production between C3 and C4 grasses and legumes. *Animal Feed Science and Technology*. 166(23):59-64
- Beauchemin, K.A., McAllister, T.A., McGinn, S.M. 2009. Dietary mitigation of enteric methane from cattle. *CAB reviews: perspectives in agriculture, veterinary science, nutrition and natural resources*. 4(35):1-18. DOI: <https://dx.doi.org/10.1079/PAVSNR20094035>.
- Bodas, R., Prieto, N., García-González, R., Andrés, S., Giráldez, F., López, S. 2012. Manipulation of rumen fermentation and methane production with plant secondary metabolites. *Animal Feed Science and Technology*. 176:78-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.010>.
- Cab-Jiménez, F.E., Ortega-Cerrilla, M.E., Quero-Carrillo, A.R., Enríquez-Quiroz, J.F., Vaquera-Huerta, H., Carranco-Jauregui, M.E. 2015. Composición química y digestibilidad de algunos árboles tropicales forrajeros de Campeche, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (11), 2199-2204. DOI: <http://dx.doi.org/10.29312/remexca.v0i11.798>.
- Cambra-López, M., García, P., Estellés, F., Torres, A. 2008. Estimación de las emisiones de los rumiantes en España: el factor de conversión de metano. *Archivos de Zootecnia*. 57, 90.
- Cardona-Iglesias, J.L., Mahecha-Ledesma, L., Angulo-Arizala, J. 2016. Arbustivas forrajeras y ácidos grasos: estrategias para disminuir la producción de metano entérico en bovinos. *Agronomía Mesoamericana*. 28(1):273-288. DOI: <http://doi.org/10.15517/am.v28i1.21466>.
- Castro-González, A., Alayón-Gamboa, J.A., Ayala-Burgos, A., Ramírez-Avilés, L. 2008. Effects of *Brosimum alicastrum* and *Lysiloma latisiliquum* mixtures on voluntary intake, nutrient digestibility and nitrogen balance in sheep fed tropical pastures. *Animal Feed Science and Technology*. 141(3-4):246-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.033>.

- Cieslak, A., Szumacher-Strabel, M., Stochmal, A., Oleszek, W. 2013. Plant components with specific activities against rumen methanogens. *Animal*. 7(2):253-265. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731113000852>.
- Cunha, C.S., Veloso, C.M., Marcondes, M.I., Mantovani, H.C., Tomich, T.R., Pereira, L.G.R., Suen, G. 2017. Assessing the impact of rumen microbial communities on methane emissions and production traits in Holstein cows in a tropical climate. *Systematic and Applied Microbiology*. 40(8):492-499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2017.07.008>.
- Delgado, D.C., Galindo, J., González, R., González, N., Scull, I., Dihigo, L., Moreira, O. 2012. Feeding of tropical trees and shrub foliages as a strategy to reduce ruminal methanogenesis: studies conducted in Cuba. *Tropical Animal Health and Production*. 44(5):1097-1104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-011-0045-5>
- Delgado, D.C., Hera, R., Cairo, J., Orta, Y. 2014. *Samanea saman*, árbol multipropósito con potencialidades como alimento alternativo para animales de interés productivo. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 48(3): 205-212.
- Elghandour, M.M.Y., Kholif, A.E., Salem, A.Z.M., De Oca, R.M., Barbabosa, A., Mariezcurrena, M., Olafadehan, O.A. 2016. Addressing sustainable ruminal methane and carbon dioxide emissions of soybean hulls by organic acid salts. *Journal of Cleaner Production*. 135:194-200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.081>.
- Espinoza-Canales, A., Gutiérrez-Bañuelos, H., Sánchez-Gutiérrez, R.A., Muro-Reyes, A., Gutiérrez-Piña, F.J., Corral-Luna, A. 2017. Calidad de forraje de canola (*Brassica napus* L.) en floraciones temprana y tardía bajo condiciones de temporal en Zacatecas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 8(3):243-248. DOI: <http://dx.doi.org/10.22319/rmcp.v8i3.4501>.
- FAO. 2018. Reducing enteric methane for improving food security and livelihoods. Disponible en: <http://www.fao.org/in-action/enteric-methane/background/what-is-enteric-methane/en> (Consultado el 12 de Junio del 2018).
- FAO. 2019. FAO's work on Climate Change. Disponible en: <http://www.fao.org/climate-change/es/> (Consultado el 24 de Mayo del 2019).
- Galindo, J., González, N., Marrero, Y., Sosa, A., Ruiz, T., Febles, G., Sarduy, L. 2014. Efecto del follaje de plantas tropicales en el control de la producción de metano y la población de protozoos ruminales *in vitro*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 48(4): 359-364.
- Gómez-Fuentes-Galindo, T., González-Rebeles, C., López-Ortiz, S., Ku-Vera, J.C., Albor-Pinto, C., Sangines-García, J.R. 2017. Dominancia, composición química-nutritiva de especies forrajearas y fitomasa potencial en una selva secundaria. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. 14(4):617-634.
- González, J.C., Ayala, A., Gutiérrez, Ernestina. 2007. Composición química de especies arbóreas con potencial forrajero de la Región de Tierra Caliente, Michoacán, México. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 41(1).
- Guerrero-Cárdenas, I., Álvarez-Cárdenas, S., Gallina, S., Corcuera, P., Ramírez-Orduña, R., Tovar-Zamora, I. 2018. Variación estacional del contenido nutricional de la dieta del borrego cimarrón del desierto (*Ovis canadensis weemsi*), en Baja California Sur, México. *Acta Zoológica Mexicana*. 34(1):1-18. DOI: <https://doi.org/10.21829/azm.2018.3412113>.
- Haque, M.N. 2018. Dietary manipulation: a sustainable way to mitigate methane emissions from ruminants. *Journal of Animal Science and Technology*. 60:15. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40781-018-0175-7>.
- Hernández, J.H., Espino Barros, O.A.V., Ronquillo, J.C.C., Castañón, S.R., de Jesús Castillo, A., Hernández, J.L. 2015. Valor nutricional de seis plantas arbóreo-arbustivas consumidas por cabras en la Mixteca Poblana, México. *Revista Ciencia y Tecnología*. 8(1):19-23. DOI: <http://dx.doi.org/10.18779/cyt.v8n1>.
- Hernández-Morales, J., Sánchez-Santillán, P., Torres-Salado, N., Herrera-Pérez, J., Rojas-García, A.R., Reyes-Vázquez, I., Mendoza-Núñez, M.A. 2018. Composición química y degradaciones in vitro de vainas y hojas de leguminosas arbóreas del trópico seco de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 9(1): 105-120.
- Herrero, M., Henderson, B., Havlík, P., Thornton, P.K., Conant, R.T., Smith, P., Butterbach-Bahl, K. 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change*. 6:452-461. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2925>.
- Holtshausen, L., Chaves, A.V., Beauchemin, K.A., McGinn, S.M., McAllister, T.A., Odongo, N.E., Benchaar, C. 2009. Feeding saponin-containing *Yucca schidigera* and *Quillaja saponaria* to decrease enteric methane

- production in dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 92(6):2809-2821. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1843>.
- Hook, S.E., Wright, A.D.G., McBride, B.W. 2010. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies. *Archaea*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2010/945785>.
- Hristov, A.N., Ivan, M., Neill, L., McAllister, T.A. 2003. Evaluation of several potential bioactive agents for reducing protozoal activity in vitro. *Animal Feed Science and Technology*. 105(1-4):163-184. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(03\)00060-9](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(03)00060-9).
- Hristov, A.N., Oh, J., Firkins, J.L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Gerber, P.J. 2013. Special topics-Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*. 91(11):5045-5069. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change 2013-The Physical Basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom-New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Johnson, K. A., y Johnson, D. E. 1995. Methane emissions from cattle. *Journal of Animal Science*. 73(8):2483-2492. DOI: <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>.
- Kumar, R., Kamra, D.N., Agarwal, N., Chaudhary, L.C., Zadbuque, S.S. 2011. Effect of tree leaves containing plant secondary metabolites on in vitro methanogenesis and fermentation of feed with buffalo rumen liquor. *Animal Nutrition and Feed Technology*. 11:103-114.
- Kumar, S., Choudhury, P.K., Carro, M.D., Griffith, G.W., Dagar, S.S., Puniya, M., Sirohi, S.K. 2014. New aspects and strategies for methane mitigation from ruminants. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 98(1):31-44. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5365-0>
- Ku-Vera, J.C., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Briceño-Poot, E.G., Ruiz-González, A., Piñero-Vázquez, A.T., Chay-Canul, A.J. 2013a. Tropical tree foliage and shrubs as feed additives in ruminant rations. *Nutritional Strategies of Animal Feed Additives*. Nova Sci. Publishers. New York. USA, (pp. 59-76).
- Ku-Vera, J.C., Canul-Solis, J.R., Pineiro-Vázquez, A.T., Briceño-Poot, E.G., Alayon-Gamboa, J.A., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Aguilar-Perez, C.F., Ramirez-Aviles, L., Castelan-Ortega, O.A. 2013b. Methane emissions from ruminants in the tropics: implications for global warming and options for mitigation. In: Basile, A. (Ed.), *Methane in the Environment: Occurrence, Uses and Production*. Nova Science Publishers, Inc., NY, pp. 267-290.
- Ku-Vera, J., Briceño, E., Ruiz, A., Mayo, R., Ayala, A., Aguilar, C., Solorio, F., Ramírez, L. 2014. Manipulación del metabolismo energético de los rumiantes en los trópicos: opciones para mejorar la producción y la calidad de la carne y leche. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*. 48(1): 43-53.
- La O, O., González, H., Hernández, J., Estrada, A., Ledea, J.L. 2018. Nutritional characterization of *Gliricidia sepium* in a saline and high drought ecosystem of the Cauto river basin, Cuba. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 52(3).
- Lakhani, N., Lakhani, P. 2018. Plant secondary metabolites as a potential source to inhibit methane production and improve animal performance. *International Journal of Chemical Studies*. 6(3):3375-3379.
- Leng, R.A. 2014. Interactions between microbial consortia in biofilms: a paradigm shift in rumen microbial ecology and enteric methane mitigation. *Animal Production Science*. 54(5): 519-543. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN13381>.
- Mandal, T.N., Gautam, T.P. 2012. Chemical analysis of fodder tree leaves found in Sunsari district, Nepal. *Bibechana, Nepal Journals Online*. 8:131-138. DOI: <https://doi.org/10.3126/bibechana.v8i0.5701>.
- Mao, H.L., Wang, J.K., Zhou, Y.Y., Liu, J.X. 2010. Effects of addition of tea saponins and soybean oil on methane production, fermentation and microbial population in the rumen of growing lambs. *Livestock Science*. 129(1-3):56-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.12.011>.
- Marienhagen, J., Bott, M. 2013. Metabolic engineering of microorganisms for the synthesis of plant natural products. *Journal of Biotechnology*. 163(2):166-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.06.001>.

- Mauricio, R.M., Ribeiro, R.S., Paciullo, D.S.C., Cangussú, M.A., Murgueitio, E., Chará, J., Estrada, M.X.F. 2019. Silvopastoral systems in latin america for biodiversity, environmental, and socioeconomic improvements. In *Agroecosystem Diversity*. Academic Press. (pp. 287-297). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00018-2>
- Mayren-Mendoza, F.J., Rojas-García, A.R., Maldonado-Peralta, M.A., Ramírez-Reynoso, O., Herrera-Pérez, J., Torres-Salado, N., Hernández-Garay, A. 2018. Comportamiento productivo de ovinos pelibuey en pastoreo suplementados con follaje de *Guazuma ulmifolia* Lam. *Agroproductividad*. 11(5).
- Meale, S.J., Chaves, A.V., Baah, J., McAllister, T.A. 2012. Methane production of different forages in in vitro ruminal fermentation. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 25(1):86-91. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.2011.11249>.
- Molina, I.C., Donney`s, G., Montoya, S., Rivera, J.E., Villegas, G., Chará, J., Barahona, R. 2015. La inclusión de *Leucaena leucocephala* reduce la producción de metano de terneras Lucerna alimentadas con *Cynodon plectostachyus* y *Megathyrus maximus*. *Livestock Research for Rural Development*. 27(5):96.
- Montenegro, J. y Abarca, S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones. *Agronomía Costarricense*, 26(1):17-24.
- Morgavi, D. P., Kelly, W. J., Janssen, P. H., y Attwood, G. T. 2013. Rumen microbial (meta) genomics and its application to ruminant production. *Animal*. 7: 184-201. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731112000419>.
- Nahed-Toral, J., Valdivieso-Pérez, A., Aguilar-Jiménez, R., Cámara-Cordova, J., Grande-Cano, D. 2013. Silvopastoral systems with traditional management in southeastern Mexico: a prototype of livestock agroforestry for cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 57:266-279. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.020>.
- Naranjo, J. F., Cuartas, C. A., Murgueitio, E., Chará, J., 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):1-7
- Ortiz-Domínguez, M., Posada, S. L., Noguera, R.R. 2014. Efecto de metabolitos secundarios de las plantas sobre la emisión entérica de metano en rumiantes. *Livestock Research for Rural Development*, 26:11.
- Oskoueian, E., Abdullah, N., Oskoueian, A. 2013. Effects of flavonoids on rumen fermentation activity, methane production, and microbial population. *BioMed Research International*. 2013:8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/349129>.
- Owen, E., Smith, T., Makkar, H. 2012. Successes and failures with animal nutrition practices and technologies in developing countries: A synthesis of an FAO e-conference. *Animal Feed Science and Technology*. 174(3-4): 211-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.03.010>.
- Patra, A. K., Kamra, D. N., Agarwal, N. 2006. Effect of plant extracts on in vitro methanogenesis, enzyme activities and fermentation of feed in rumen liquor of buffalo. *Animal Feed Science and Technology*. 128(3-4): 276-291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.11.001>.
- Patra A. K., Saxena, J. 2009. Dietary phytochemicals as rumen modifiers: a review of the effects on microbial populations. *Antonie van Leeuwenhoek*. 96(4):363-375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10482-009-9364-1>.
- Patra, A. K., Saxena, J. 2010. A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry*. 71(11-12):1198-1222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2010.05.010>.
- Patra A.K., Saxena, J. 2011. Exploitation of dietary tannins to improve rumen metabolism and ruminant nutrition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91: 24–37. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.4152>.
- Patra A.K., Yu, Z. 2013. Effective reduction of enteric methane production by a combination of nitrate and saponin without adverse effect on feed degradability fermentation, or bacterial and archaeal communities of the rumen. *Bioresource Technology*. 148:352–360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.140>.
- Pavarini, D.P., Pavarini, S.P., Niehues, M., Lopes, N.P. 2012. Exogenous influences on plant secondary metabolite levels. *Animal Feed Science and Technology*. 176(1-4):5-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.002>.

- Pech-Cervantes, A.A., Ventura-Cordero, J., Capetillo-Leal, C.M., Torres-Acosta, J.F.J., Sandoval-Castro, C.A. 2016. Relationship between intake of tannin-containing tropical tree forage, PEG supplementation, and salivary haze development in hair sheep and goats. *Biochemical Systematics and Ecology*. 68:101-108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2016.07.003>.
- Piñero-Vázquez, A.T., Canul-Solis, J.R., Alayón-Gamboa, J.A., Chay-Canul, A.J., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Ku-Vera, J.C. 2017. Energy utilization, nitrogen balance and microbial protein supply in cattle fed *Pennisetum purpureum* and condensed tannins. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 101: 159-169. DOI: <https://doi.org/10.1111/jpn.12436>.
- Rivera, J.E., Molina, I.C., Donneys, G., Villegas, G., Chará, J., Barahona, R. 2015. Dinámica de fermentación y producción in vitro de metano en dietas de sistemas silvopastoriles intensivos con *L. leucocephala* y sistemas convencionales orientados a la producción de leche. *Livestock Research for Rural Development*. 27(4):1-15.
- Rivera, J., Chará, J., Barahona, R. 2016. Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 19(3):237-251.
- Rivera, J. E., Molina, I.C, Chara, J., Murgueitio, E. y Barahona, R. 2017. Intensive silvopastoral systems with *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: productive alternative in the tropic in view of the climate change. *Pastos y Forrajes*. 40(3):159-170
- Rivera, J.E., Chará, J., Gómez-Leyva, J.F., Ruíz, T., Barahona, R. 2018. Variabilidad fenotípica y composición fitoquímica de *Tithonia diversifolia* A. Gray para la producción animal sostenible. *Livestock Research for Rural Development*. 30:200.
- Roa, M.L., Galeano, J.R. 2015. Calidad nutricional y digestibilidad in situ de ensilajes de cuatro leñosas forrajeras. *Pastos y Forrajes*. 38(4):431-440.
- Rodríguez, R., Britos, A., Rodríguez-Romero, N., Fondevila, M. 2011. Effect of plant extracts from several tanniferous browse legumes on in vitro microbial fermentation of the tropical grass *Pennisetum purpureum*. *Animal Feed Science and Technology*. 168(3-4):188-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.095>.
- Rojas-Schroeder, J.A., Sarmiento-Franco, L.A., Sandoval-Castro, C.A., Santos-Ricalde, R.H. 2017. Use of foliage from ramón (*Brosimum alicastrum* Swarth) in animal feeding. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 20(2017): 363-371.
- Russo, R.O. 2015. Reflexiones sobre los sistemas silvopastoriles. *Pastos y forrajes*. 38(2):157-161
- Salazar, S.S.V., Vázquez, A.T.P., Botero, I.C.M., Balbuena, F.J.L., Narváez, J.J.U., Campos, M.R.S., Vera, J.C.K. 2018. Potential of *Samanea saman* pod meal for enteric methane mitigation in crossbred heifers fed low-quality tropical grass. *Agricultural and Forest Meteorology*. 258:108-116. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.262>.
- Sejian, V., Bhatta, R., Soren, N.M., Malik, P.K., Ravindra, J.P., Prasad, C.S., Lal, R. 2015. Introduction to Concepts of Climate Change Impact on Livestock and Its Adaptation and Mitigation. In: Sejian V., Gaughan J., Baumgard L., Prasad C. (eds) *Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation*. Springer, New Delhi, (pp. 1-23). DOI: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2265-1_1.
- Sheikh, A.A., Bhagat, R., Islam, S.T., Dar, R.R., Sheikh, S.A., Wani, J.M., Dogra, P. 2017. Effect of climate change on reproduction and milk production performance of livestock: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 6:2062-2064.
- Song, N., Zhang, M.T., Binstead, R.A., Fang, Z., Meyer, T.J. 2014. Multiple Pathways in the Oxidation of a NADH Analogue. *Inorganic chemistry*. 53(8):4100-4105. DOI: <https://doi.org/10.1021/ic500072e>.
- Staerfl, S.M, Zeitz, J.O., Kreuzer, M., Soliva, C.R. 2012. Methane conversion rate of bulls fattened on grass or maize silage as compared with the IPCC default values, and the long-term methane mitigation efficiency of adding acacia tannin, garlic, maca and lupine. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 148: 111– 120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.003>.
- Van Lingen, H.J., Plugge, C.M., Fadel, J.G., Kebreab, E., Bannink, A., Dijkstra, J. 2016. Thermodynamic driving force of hydrogen on rumen microbial metabolism: a theoretical

- investigation. PLoS One. 11(12):e0168052. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.016805>.
- Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C.A., Marche, C., Decruyenaere, V., Beckers, Y., Bindelle, J. 2016. Behaviour and browse species selectivity of heifers grazing in a temperate silvopastoral system. Agroforestry Systems. 92 (3):705–716. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0041-x>.
- Vargas, J., Cárdenas, E., Pabón, M., y Carulla, J. 2011. Emisión de metano entérico en rumiantes en pastoreo. Archivos de Zootecnia. 61(237):51-66. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v61i237.2958>.
- Vélez, O.M., Campos, R., Sánchez, H., Giraldo, L.A. 2017. Evaluación de diferentes niveles de inclusión de plantas nativas de sabanas inundables sobre una dieta basal de *Brachiaria humidicola* y su efecto sobre la producción de metano in vitro. Archivos de Zootecnia. 66(255):343-352. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v66i255.2509>.
- Vélez-Terranova, M., Campos-Gaona, R., Sánchez-Guerrero, H. 2014. Uso de metabolitos secundarios de las plantas para reducir la metanogénesis ruminal. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 17(3):489-499.
- Wallace, R.J. 2004. Antimicrobial properties of plant secondary metabolites. Proceedings of the Nutrition Society. 63(4):621-629. DOI: <https://doi.org/10.1079/PNS2004393>.
- Wallace, R.J., Rooke, J.A., McKain, N., Duthie, C.A., Hyslop, J.J., Ross, D.W., Roehe, R. 2015. The rumen microbial metagenome associated with high methane production in cattle. BMC Genomics. 16:839. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-015-2032-0>.
- Wanapat, M., Cherdthong, A., Phesatcha, K., Kang, S. 2015. Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability. Animal Nutrition. 1(3):96-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2015.07.004>.
- Whitney, T.R., Glasscock, J.L., Muir, J.P., Stewart, W.C., Scholljegerdes, E.J. 2017. Substituting ground woody plants for cottonseed hulls in lamb feedlot diets: growth performance, blood serum chemistry, and rumen fluid parameters. Journal of Animal Science. 95(9), 4150-4163. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas2017.1649>.