Análisis y Comentario

Sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: alternativa productiva en el trópico ante el cambio climático

Intensive silvopastoral systems with *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit: productive alternative in the tropic in view of the climate change

Julián Esteban Rivera-Herrera¹, Isabel Molina-Botero¹, Julián Chará-Orozco¹, Enrique Murgueitio-Restrepo¹ y Rolando Barahona-Rosales²

¹ Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV)

Carrera 25 #6-62, Cali, Colombia

² Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Correo electrónico: jerivera@fun.cipav.org.co

Resumen

En este artículo se presenta un análisis descriptivo y valorativo de los beneficios productivos y ambientales de los SSPi con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, con énfasis en los aspectos de calidad nutricional, producción de biomasa, consumo voluntario, productividad animal y emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello se hizo una revisión bibliográfica acerca de las investigaciones durante los últimos 15 años, referentes a los sistemas de producción animal en condiciones tropicales, con énfasis en las realizadas en Colombia. Se comprobó que la oferta forrajera en SSPi con leucaena tiene un contenido de proteína superior al 22 % y un menor contenido de fibra (20-30 %) respecto a la mayoría de los pastos tropicales. Adicionalmente, la leucaena tiene la capacidad de soportar el ramoneo intenso, y su presencia incrementa la productividad vegetal y animal. Los animales producen al menos dos o tres veces más carne y leche ha⁻¹ año⁻¹ como resultado de un mayor consumo de nutrientes y una mayor oferta forrajera, dado que con esta leguminosa el consumo de materia seca (MS) puede ser 1,3 veces mayor que el observado en sistemas convencionales, y la producción forrajera puede incrementarse de 5 a 18 t de MS ha⁻¹ año⁻¹. Por otra parte, la inclusión de *L. leucocephala* permite disminuir las emisiones entéricas de CH₄ en cantidades cercanas a un 20 % por kilogramo de carne o leche producida y por kilogramo de materia seca consumida. En comparación con los sistemas tradicionales, en los que se incluye *L. leucocephala*, se incrementa la eficiencia en la producción y disminuyen los efectos ambientales negativos de la ganadería.

Palabras clave: calidad forrajera, metano, sistema de pastoreo.

Abstract

This paper presents a descriptive and evaluative analysis of the productive and environmental of SPSi with *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, emphasizing the nutritional quality, biomass production, voluntary intake, animal productivity and greenhouse gas emission aspects. For such purpose, a bibliographic review was made about the studies in the last 15 years, concerning animal production systems under tropical conditions, stressing the ones conducted in Colombia. It was noticed that the forage offer in SPSi with leucaena has a protein content higher than 22 % and a lower fiber content (20-30 %) with regards to most tropical pastures. Additionally, leucaena has the capacity to withstand intense browsing, and its presence increases plant and animal productivity. The animals produce at least two or three times more meat and milk ha⁻¹ year⁻¹ as the result of a higher nutrient intake and higher forage offer, because with this legume the dry matter (DM) intake can be 1,3 times higher than the one observed in conventional systems, and the forage production can be from 5 to 18 t DM ha⁻¹. On the other hand, the inclusion of *L. leucocephala* allows to decrease the enteric emissions of CH₄ in amounts close to 20 % per kilogram of produced meat or milk and per kilogram of consumed dry matter. Compared with the traditional systems, in the ones in which *L. leucocephala* is included, the efficiency in production is increased and the negative environmental effects of animal husbandry are decreased.

Keywords: forage quality, methane, grazing system

Introducción

Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit, comúnmente llamada leucaena, acacia forrajera o carbonero blanco, es una leguminosa perenne, con un amplio potencial para la alimentación de los rumiantes y capaz de crecer con gramíneas acompañantes en condiciones tropicales y subtropicales. Se desarrolla en suelos bien drenados, con pH de neutro a alto, por debajo de los 1 400 metros de altitud y con aceptable fertilidad (Murgueitio *et al.*, 2011). Cuando se maneja como arbusto esta especie resulta tolerante a la sequía, y es reconocida por su alto valor forrajero, debido a su capacidad de rebrote, palatabilidad y características nutricionales superiores, que incluyen un alto contenido de proteína cruda y carbohidratos solubles, además de un bajo contenido de fibra (Cuartas *et al.*, 2015a; Gaviria *et al.*, 2015a).

En los últimos años se ha comprobado que existen abundantes evidencias sobre las ventajas nutricionales de *L. leucocephala* para la alimentación de rumiantes y su contribución para generar sistemas más productivos y sostenibles en condiciones tropicales (Murgueitio *et al.*, 2015; Gaviria *et al.*, 2015b). Debido a su alta producción de forraje y calidad nutricional, en los sistemas que incluyen esta leguminosa es posible emplear una mayor carga animal por hectárea y obtener ganancias de peso y producciones superiores de leche en rumiantes, respecto a las que se alcanzan en otros sistemas forrajeros tropicales (Mohammed *et al.*, 2015; Gaviria *et al.*, 2015b).

De ahí que la intensificación de la ganadería bovina con el uso de *L. leucocephala*, principalmente en sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), contribuya a la provisión de forrajes de buena calidad, la rehabilitación de ecosistemas degradados y la mitigación y adaptación al cambio climático (Havlík *et al.*, 2013). Las menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a este tipo de sistemas se deben tanto a las características de sus forrajes como a su mayor eficiencia productiva (Molina *et al.*, 2013; Rivera *et al.*, 2016).

Por tanto, en este artículo se hace un análisis descriptivo y valorativo de los beneficios productivos y ambientales de los SSPi con *L. leucocephala*, con énfasis en los aspectos de calidad nutricional, producción de biomasa, consumo voluntario, productividad animal y emisiones de GEI.

Principales sistemas de pastoreo objeto de estudio en el trópico

En la extensa y detallada revisión bibliográfica acerca de las investigaciones realizadas durante los

últimos 15 años referentes a los sistemas de producción animal en condiciones tropicales, con énfasis en las efectuadas en Colombia, entre los principales sistemas de pastoreo que se identificaron se encuentran aquellos con oferta de *L. leucocephala* y los de praderas de monocultivo de gramíneas.

Los primeros, que incluyeron la leucaena, fueron arreglos silvopastoriles intensivos (SSPi) caracterizados por una alta densidad del cultivar Cunningham de esta leguminosa (> 20 000 arbustos ha⁻¹), asociado con gramíneas como *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilg. y *Megathyrsus maximus* (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs, y con otros árboles dispersos en el potrero de diferentes características. Estos SSPi se manejaron con rotación mediante el uso de cercas eléctricas, con períodos de ocupación entre 12 y 24 horas y tiempos de descanso cercanos a los 45 días, con oferta de agua y sal *ad libitum*. Asimismo, tenían entre 5 y 20 años de establecidos, en condiciones de bosque seco tropical (bs-T) y bosque húmedo tropical (bh-T).

Mientras, entre las praderas de monocultivo de gramíneas, llamadas también sistemas convencionales o tradicionales, sobresalieron las pasturas mejoradas (PM) y las pasturas degradadas (PD). Las PM generalmente estaban compuestas por especies como *C. plectostachyus* y *M. maximus*, con algún tipo de fertilización y riego esporádico, manejo rotacional y oferta de agua y sal *ad libitum*. En tanto, las PD estaban constituidas por gramas nativas solas o mezcladas con *C. plectostachyus* y *Dichanthium aristatum* (Poir.) C.E. Hubb., con muy baja producción de biomasa forrajera y manejadas sin fertilización ni riego. En todos los casos, estos sistemas se encontraban localizados en lotes aledaños a los SSPi y también en condiciones de bs-T y/o bh-T.

Como temas importantes de estos tipos de sistemas productivos, a continuación se analizarán los relacionados con la caracterización nutricional del forraje, el consumo voluntario de los animales, la productividad vegetal y animal, así como las emisiones de metano (CH₄) y otros GEI.

Composición química general y consideraciones nutricionales en SSPi con *L. leucocephala*

Para la determinación de la composición química y otros aspectos nutricionales de las materias primas y de las dietas en las diferentes investigaciones

cuyos resultados se reseñan, se utilizaron métodos convencionales. En general, se evaluaron los siguientes indicadores: contenido de materia seca (MS), fibra en detergente neutro y ácido (FDN y FDA, respectivamente), proteína cruda (PC), cenizas (Cen.), calcio (Ca), fósforo (P), lignina (Lig.), extracto etéreo (EE) y energía bruta (EB), además de la dinámica de degradación y fermentación por medio de la técnica de producción de gases (Mauricio *et al.*, 1999). El contenido de nitrógeno (N) y el de PC fueron determinados por el método de Kjeldahl (ICONTEC, 1999); el de FDN y FDA, según la AOAC (2005); y el EE, por extracción Soxhlet por inmersión (ICONTEC, 1973). El contenido de Cen. se determinó por incineración directa en mufla a 500 °C (AOAC, 2005); el contenido de Ca y P, por espectrofotometría AA y UV-VIS, respectivamente (ICONTEC, 2013); la MS, por la técnica de estufa de aire forzado; y la EB, por calorimetría (ISO, 1998).

La composición química, la degradabilidad y el comportamiento a nivel ruminal de *L. leucocephala* mostraron su alto valor nutricional para animales en pastoreo. Singh *et al.* (2014), Gaviria *et al.* (2015b) y Cuartas *et al.* (2015a) informaron que el forraje de *L. leucocephala* tiene altos niveles de PC (por encima del 22 % de la MS), bajos contenidos de FDN y FDA (menos del 40 y 30 %, respectivamente) y un contenido aceptable de Ca y P. Adicionalmente, *L. leucocephala* posee niveles intermedios de degradabilidad de la MS (> 50 %) y adecuados porcentajes de fracciones A y B, tanto de carbohidratos (16,7 y 14,94, respectivamente) como de proteínas (34 y 53, respectivamente), por lo que esta leguminosa resulta superior desde el punto de vista nutricional en comparación con los forrajes tradicionalmente utilizados en los sistemas ganaderos tropicales y subtropicales.

La asociación de *L. leucocephala* con gramíneas en SSPi contribuye a aumentar el contenido de proteína de la dieta (de un 10 % a, por lo menos, un 13 %), en comparación con los mismos pastos en monocultivo (Gaviria *et al.*, 2015a); a la par que se reduce el contenido de FDN, que pasa de 69,8 a 60,7 % en dietas basadas en *C. plectostachyus* solamente (Cuartas *et al.*, 2013). En consecuencia, la dieta ofrecida en un SSPi se ajusta más a los requerimientos nutricionales de los animales, y así aumenta la eficiencia ganadera.

Consumo de *L. leucocephala* por bovinos en pastoreo

Para la cuantificación del consumo voluntario, en unas investigaciones se utilizó la técnica de n-alcanos (Mayes *et al.*, 1986), con novillos de 250 a 350 kg de peso vivo en pastoreo, en condiciones de bs-T (Gaviria-Uribe *et al.*, 2015c); mientras que en otros estudios se hizo a través de la cuantificación de la oferta y el rechazo en animales confinados (Molina *et al.*, 2016).

El consumo voluntario, la composición química de los alimentos y su degradabilidad son fundamentales para determinar la cantidad de nutrientes disponibles (Sossa *et al.*, 2015). Un mayor consumo implica que más nutrientes pueden ser aprovechados por los animales, con lo cual pueden incrementar su desempeño productivo.

Los animales que pastorearon en SSPi con presencia de *L. leucocephala* tuvieron consumos de MS hasta 1,3 veces mayores que aquellos que pastorearon en sistemas convencionales de pastoreo (tabla 2). En los SSPi, el consumo de leucaena puede representar entre el 25 y el 30 % del total de MS ingerida (Cuartas *et al.*, 2015b; Gaviria-Uribe *et al.*, 2015c).

Tabla 1. Composición química de *L. leucocephala* en diferentes estudios realizados en Colombia

MS	FDN	FDA	Lig.	PC	EE	Ca	P	Cen.	EB	Fuente
Porcentaje de la MS									Mcal kg ⁻¹	
25,2	36,8	22,1	-	29,4	2,74	1,2	0,25	7,83	4 676	Gaviria <i>et al.</i> (2015b)
-	32,5	29,3	-	27,6	2,95	1,23	0,25	8,4	4 652	Gaviria <i>et al.</i> (2015a)
-	33,6	28,3	-	26,1	2,92	1,34	0,23	8,59	4 640	Gaviria <i>et al.</i> (2015c)
-	32,4	13,8	-	27,6	2,21	1,42	0,21	6,92	-	Cuartas <i>et al.</i> (2015b)
21,9	33,4	22,2	7,7	26,8	2,31	1,43	0,22	6,95	4 170	Cuartas <i>et al.</i> (2014)
27,7	34	30,9	-	27,2	1,82	0,88	0,24	7,1	4 375	Molina <i>et al.</i> (2016)
24,5	27,7	23,6	7,9	28,2	3,28	1,19	0,19	8,15	4 720	Molina <i>et al.</i> (2013)
21,2	33,9	12,5	-	28,2	-	0,96	0,21	8,04	3 854	Cuartas <i>et al.</i> (2015a)

Tabla 2. Consumo diario por animal de MS y nutrientes en sistemas SSPi y PM, en Colombia

Fracción	SSPi con <i>L. leucocephala</i> *	SSPi con <i>L. leucocephala</i> **	Monocultivo con <i>M. maximus</i> *
Proteína cruda (kg)	0,95	1,24	0,5
FDN (kg)	3,34	5,81	3,46
FDA (kg)	1,72	3,01	1,88
Lignina (kg)	0,4	-	0,34
Celulosa (kg)	1,32	-	1,54
Hemicelulosa (kg)	1,62	-	1,58
Calcio (g)	62,1	69,9	36,2
Fósforo (g)	10,1	20,1	9,6
Extracto etéreo (g)	94,2	160	69,6
Cenizas (kg)	0,52	1,12	0,59
Materia orgánica (kg)	5,47	-	5,8
Materia seca (kg)	5,99	9,45	5,29
Materia seca (% del peso vivo)	2,42	2,46	2,13

*Cuartas *et al.* (2015b): novillos de raza Cebú con peso vivo de $248 \pm 23,1$ kg; **Gaviria *et al.* (2015c): novillos de raza Cebú con peso vivo de 381 ± 12 kg. Los consumos totales en SSPi difieren, probablemente por el peso de los animales.

Ello puede deberse a los siguientes factores:

1) La mayor oferta de forraje en los SSPi con *L. leucocephala*, que puede ser hasta el 230 % superior que la de los sistemas convencionales como PM y PD basados solamente en gramíneas tropicales, permite una mayor disponibilidad y selectividad para los animales (Broom *et al.*, 2013; Gaviria-Uribe *et al.*, 2015c).

2) Según Gaviria-Uribe *et al.* (2015c) y Cuartas *et al.* (2015a), el contenido de FDN en dietas de *M. maximus* y *C. plectostachyus* puede disminuir en un 15 % cuando se incluye el 25 % de *L. leucocephala*, mientras que el contenido de FDA puede reducirse en un 20 %. Por otro lado, el bajo contenido de fibra en la dieta mejora el consumo, al permitir tasas de pasaje más altas (Boval y Dixon, 2012). Además, las partículas de leguminosas son cúbicas mientras que las de gramíneas son largas y delgadas, lo que implica mayores tasas de pasaje en especies como *L. leucocephala* (Barahona-Rosales y Sánchez, 2005).

3) En los SSPi con *L. leucocephala*, se logra un mayor confort térmico para los animales y estos dedican más tiempo al ramoneo y pastoreo, pues tienen posibilidades de ingerir mayor cantidad de biomasa (Broom *et al.*, 2013). Molina *et al.* (2016) informaron que al incluir *L. leucocephala* en un 24 % en la dieta de novillas de levante en confinamiento, el consumo de MS pasó de 2,02 a 2,47 % del peso vivo animal ($p = 0,01$).

Productividad vegetal y animal

Para la cuantificación de MS disponible en praderas en monocultivo, Cajas-Girón *et al.* (2011) y Gaviria *et al.* (2015b) utilizaron la técnica de aforos con doble muestreo, de acuerdo al método descrito por Haydock y Shaw (1975); mientras que para la biomasa proveniente de los arbustos de leucaena emplearon una modificación de ese mismo método, con una escala de cinco estratos en segmentos de un metro lineal, representativos de diferentes niveles de crecimiento. En estos segmentos se cosechó y pesó el material vegetal que era consumido por los animales (hojas y tallos finos), y con la referida escala se realizaron al menos 50 observaciones para estimar la disponibilidad de forraje de cada franja.

Por otra parte, la estimación de la productividad animal, según los estudios de Gaviria *et al.* (2012), Cuartas *et al.* (2013), Rivera *et al.* (2013) y Mohammed *et al.* (2015), se efectuó mediante pesajes periódicos a los animales y a la leche producida en los sistemas de doble propósito y de lechería especializada; mientras que la producción por hectárea se estimó a partir de las producciones individuales en cada sistema y la carga animal, que a su vez se determinó teniendo en cuenta la oferta (aforos) y la demanda (requerimientos) de MS.

Debido a la mejora de la calidad nutricional y al mayor consumo de nutrientes, en los sistemas que incluyen *L. leucocephala* se produce más carne y leche que en los convencionales (Cuartas *et al.*,

2014). Además, la ganadería basada en estos sistemas es más rentable (González, 2013).

En relación con la productividad vegetal, en los SSPi con leucaena la oferta de biomasa puede ser superior a las 16 t de MS ha⁻¹ año⁻¹, con menores fluctuaciones en el período poco lluvioso y sin la aplicación de fertilizantes (Gaviria *et al.*, 2012; Gaviria *et al.*, 2015b). Esta oferta es similar a la informada por Naranjo *et al.* (2012) para sistemas de gramíneas con riego y alta dependencia de insumos externos (tabla 3), y superior a las 7 t ha⁻¹ año⁻¹ de MS disponibles que se señalan para PD que cubren una buena parte del país (Cajas-Girón *et al.*, 2011).

Según Gaviria *et al.* (2015a) y Cuartas *et al.* (2015b), el aporte de *L. leucocephala* puede estar alrededor de las 4,3 t ha⁻¹ año⁻¹ de MS. La mayor producción de biomasa en SSPi respecto a los sistemas convencionales se debe a la presencia de estratos aéreos que permiten mayor captura de luz solar y sistemas radicales más profundos que absorben nutrientes y humedad de manera más eficiente (Murgueitio *et al.*, 2011; Broom *et al.*, 2013), y a la capacidad de esta leguminosa de fijar N atmosférico y aportarlo a las gramíneas acompañantes.

En cuanto a la producción de leche, en la región del Caribe seco colombiano Rivera *et al.* (2015b) reportaron 5 551 L ha⁻¹ año⁻¹ en un SSPi con *L. leucocephala* (10 000 arbustos ha⁻¹), *C. plectostachyus* y *M. maximus*; y 1 150 L ha⁻¹ año⁻¹ en un sistema convencional de pastoreo sin árboles. Asimismo, en el SSPi el contenido de proteína, grasa y sólidos totales en la leche fue significativamente superior ($p < 0,05$). Las producciones de sólidos totales, grasa y proteína por animal día⁻¹ fueron de 0,59 vs. 0,51; 0,22 vs. 0,17 y 0,15 vs. 0,13 kg para el SSPi y la PD, respectivamente. Por otra parte, Paciullo *et*

al. (2014) informaron que en Brasil la asociación de leucaena con pasturas de *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster (= *Brachiaria decumbens* Stapf.) permite incrementar la producción de leche de 9,5 a 10,4 litros vaca día⁻¹ ($p < 0,05$).

Las características de la leche producida en SSPi permiten aumentar el rendimiento de productos lácteos y la eficiencia en la transformación en queso en la época de seca, respecto a la leche producida por animales suplementados con sorgo. A pesar de utilizar menor suplementación, el SSPi no difirió del sistema convencional en cuanto a la producción, según Mohammed *et al.* (2015), quienes indicaron también una mayor rentabilidad económica en el sistema con leucaena. Por su parte, González (2013) estimó tasas internas de retorno (TIR) del 13 % en sistemas con leucaena y de solo un 0,7 % en sistemas convencionales, en México.

En relación con la productividad cárnica, al analizar en Colombia dos SSPi con leucaena, Gaviria *et al.* (2012) observaron que las ganancias individuales de peso resultaron mayores en un 45 y 70 %, respecto a las de PM y PD. Además, la productividad por hectárea fue muy superior en los SSPi, gracias a la mayor carga animal (2,34 vs. 4 UGG) y ganancia de peso animal (830 kg ha⁻¹ año⁻¹); mientras que en el país el promedio de producción en sistemas de carne está cercano a los 120 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Finalmente, en relación con la calidad de la carne, Montoya *et al.* (2015) encontraron que animales provenientes de sistemas con leucaena produjeron carne de mayor ternesa, mejor pH y color, así como también alcanzaron mayores pesos al beneficio, peso en canal caliente y porcentaje de rendimiento, que los animales de sistemas tradicionales de pastoreo. También se observó que la dieta del SSPi

Tabla 3. Productividad vegetal y animal en sistemas orientados a la producción de leche en diferentes regiones de Colombia

Respuesta productiva	PD***	SSPi Tolima* (Piedras)	SSPi Cesar** (Codazzi)	SSPi Valle* (Cerrito)	SSPi Valle* (Bugalagrande)
Productividad vegetal (t MS ha ⁻¹ año ⁻¹)	7,0	15,4	13,9	12,4	17,9
Carga UGG ha ⁻¹ (1 UGG = 450 kg)	0,80	2,90	3,30	3,34	3,80
Producción por animal (L día ⁻¹)	3,3	11,6	3,9	11,4	11,8
Productividad animal (L ha ⁻¹ año ⁻¹)	1 150	13 462	5 551	15 725	18 412

MS: materia seca, UGG: unidad gran ganado, PD: pastura tradicional con pasturas nativas y degradadas, SSPi: sistema silvopastoril intensivo con densidades de leucaena por encima de los 10 000 árboles ha⁻¹ y *C. plectostachyus*; * datos inéditos; ** Rivera *et al.* (2009); *** Cajas *et al.* (2011).

Tabla 4. Respuesta productiva en sistemas tradicionales y sistemas con leucaena para la producción de carne

Respuesta productiva	PT*	PM*	SSPi 1**	SSPi 2**	SSPi 3***
Productividad vegetal (t MS ha ⁻¹ año ⁻¹)	7	19,2	19,2	15,6	15,4
Carga UGG ha ⁻¹ (1 UGG = 450 kg)	0,85	2,34	4	2,71	3,5
Ganancia por animal (kg día ⁻¹)	0,25	0,4	0,42	0,84	0,69
Productividad animal (kg carne ha ⁻¹ año ⁻¹)	77,6	341,6	609	827	864

PT: pastura tradicional con pasturas nativas y degradadas, PM: pastura mejorada o introducida basada en *C. plectostachyus* y *M. maximus*, SSPi: sistema silvopastoril intensivo con densidades de leucaena por encima de los 10 000 arbustos ha⁻¹ y *C. plectostachyus*, UGG: unidad gran ganado; *Cajas-Girón *et al.* (2011), ** Gaviria *et al.* (2012), *** Mahecha *et al.* (2012).

puede mejorar el perfil de ácidos grasos, al incrementar el porcentaje de ácidos grasos insaturados, lo cual genera la posibilidad de entrar a mercados especiales con mayor valor comercial. En la tabla 5 se presentan algunos resultados obtenidos por los autores anteriormente citados en cuanto a la cantidad de ácidos grasos en 100 g de carne.

Emisiones de metano (CH₄) y otros GEI

Las mediciones de CH₄ emitido por fermentación entérica fueron realizadas por Molina *et al.* (2016), mediante la técnica del politúnel, en novillas de 218-280 kg de peso vivo, en condiciones de bs-T. A su vez, para determinar los flujos de CH₄, N₂O y CO₂ provenientes de praderas, Rivera *et al.* (2015) utilizaron la técnica de cámaras cerradas estáticas. Mientras que para estimar la huella de carbono, Rivera *et al.* (2016) usaron la metodología de la ISO 14044 para el cálculo de emisiones dentro y fuera (fabricación y transporte de insumos) de la finca.

En diferentes estudios, se ha evidenciado la capacidad de los sistemas con *L. leucocephala* para reducir las emisiones de GEI en bovinos. Estas determinaciones incluyen la producción de CH₄ por fermentación en-

térica, tanto *in vivo* (Molina *et al.*, 2013; Molina *et al.*, 2016) como *in vitro* (Huang *et al.*, 2011; Molina *et al.*, 2013; Rivera, 2015), la determinación de la huella de carbono y el balance de GEI (Naranjo *et al.*, 2012; Harrison *et al.*, 2015; Rivera *et al.*, 2016), y la medición de los flujos de gases provenientes de praderas y excreciones bovinas.

En lo referente a las emisiones entéricas de CH₄, Molina *et al.* (2016) informaron que con dietas basadas en *C. plectostachyus* e inclusión de aproximadamente 25 % de *L. leucocephala*, ofrecidas a novillas, estas emisiones pueden disminuir en 15 % por kilogramo de materia seca consumida (MSC), ya que disminuyeron de 43,6 a 37,7 L de CH₄ kg⁻¹ de MSC (tabla 6). Además, hubo menor pérdida de energía por producción de CH₄ en las dietas con *L. leucocephala*. Molina *et al.* (2015) hallaron resultados similares al evaluar las emisiones entéricas de metano en respuesta a una inclusión de 24 % de *L. leucocephala* en dietas basadas en *C. plectostachyus* y *M. maximus*.

En ambas evaluaciones, a pesar de que los animales en los sistemas con leucaena consumieron de un 15 a 20 % más de MS, las emisiones totales por

Tabla 5. Cantidad de ácidos grasos en 100 gramos de carne en animales engordados en SSPi y en pasturas mejoradas, en dos regiones de Colombia

Cantidad de ácido graso (g 100 g ⁻¹ de carne)	SSPi 1	SSPi 2	PM	ST	p < 0,05
Ácidos grasos totales	0,87 ^{ab}	1,26 ^a	0,66 ^b	1,15 ^a	0,0124
Mirístico (C 14)	0,03 ^{ab}	0,04 ^a	0,02 ^b	0,04 ^a	0,0057
Palmitico (C 16)	0,28 ^{ab}	0,37 ^a	0,19 ^b	0,38 ^a	0,008
Estearico (C 18:0)	0,20 ^{ab}	0,29 ^a	0,16 ^b	0,25 ^{ab}	0,0335
Oleico (C 18:1)	0,32 ^{ab}	0,46 ^a	0,23 ^b	0,40 ^a	0,011
Linoleico (C 18:2)	0,04 ^b	0,08 ^a	0,05 ^{ab}	0,06 ^{ab}	0,0294
Linolenico (C 18: 3)	0,01 ^b	0,02 ^a	0,02 ^{ab}	0,01 ^b	0,007

SSPi 1: sistema silvopastoril intensivo basado en *L. leucocephala*, *M. maximus* y *C. plectostachyus*; SSPi 2: sistema silvopastoril intensivo basado en *L. leucocephala*, *M. maximus* y *G. sepium*; PM: pastura mejorada de *C. plectostachyus*, ST: sistema tradicional basado en *Dichanthium aristatum*.

Fuente: Montoya *et al.* (2015)

Tabla 6. Emisiones *in vivo* de metano entérico en novillas alimentadas con dietas basadas en gramíneas (*C. plectostachyus* y *M. maximus*) y SSPi con *L. leucocephala*

	Monocultivo	SSPi	Valor <i>p</i>
Molina <i>et al.</i> (2015)			
CH ₄ (L día ⁻¹)	243,1	228	0,6
CH ₄ (g kg ⁻¹ de MSC)	26,9	20,6	0,05
CH ₄ (g kg ⁻¹ de MSD)	55,7	37,6	0,01
Ym (%)	9,09	6,74	0,04
Molina <i>et al.</i> (2016)			
CH ₄ (L día ⁻¹)	202,2	208,6	0,78
CH ₄ (g kg ⁻¹ de MSC)	30,8	26,6	0,23
CH ₄ (g kg ⁻¹ de MSD)	57,7	39,5	0,04
Ym (%)	9,42	7,96	0,32

Monocultivo: sistema basado en *C. plectostachyus*, SSPi: sistema silvopastoril intensivo con densidades de leucaena por encima de los 10 000 arbustos ha⁻¹ y *C. plectostachyus*, MSC: materia seca consumida, MSD: materia seca degradada; Ym: energía bruta consumida, pérdida en forma de CH₄.

animal solo se incrementaron en un 3 % como promedio, sin diferencias significativas. Ello se debe a que con la inclusión de la leucaena disminuyen los tenores totales de FDN, y esto reduce las emisiones de metano (Archimède *et al.*, 2011). Otro elemento que contribuye a la disminución de las emisiones de CH₄ cuando se ofrece leucaena es la presencia de taninos condensados (Barahona-Rosales *et al.*, 2000). Estos componentes posiblemente inhiban el crecimiento de *Archaea* en el rumen, y su efecto depende de la estructura química y de su cantidad (Archimède *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2011).

En un estudio *in vitro* realizado por Rivera *et al.* (2015) en Colombia, se halló que con la inclusión de un 25 % de leucaena en dietas con *C. plectostachyus* se disminuyó el CH₄ en un 8 % por kilogramo de MS potencialmente consumida ($p = 0,0029$) y en un 13 % por kilogramo de MS degradada ($p = 0,0016$).

Por otra parte, la inclusión de *L. leucocephala* resulta en una menor huella de carbono en la carne y la leche producidas en SSPi. Rivera *et al.* (2016) informaron que en un SSPi con leucaena disminuyeron en un 12 % los kilogramos de CO₂-eq emitidos en la producción de un kilogramo de leche corregida por grasa y proteína (LCGP); en relación con un sistema intensivo basado en pasto estrella, con riego, oferta de alimentos concentrados y fertilización, en condiciones tropicales (2,05 vs. 2,34 kg de CO₂-eq, respectivamente). A su vez, en el sistema con leucaena decrecieron en un 19 y un 23 % las emisiones de GEI asociadas con la producción

de un kilogramo de grasa y de proteína (42,3 vs. 54,9 CO₂-eq kg⁻¹ y 47,3 vs 58,3 CO₂-eq kg⁻¹, respectivamente).

Rivera *et al.* (2016) reportaron que en sistemas basados en *L. leucocephala* se reduce la intensidad de las emisiones gracias a su alta productividad, calidad de la dieta, baja dependencia de insumos externos (como fertilizantes y alimentos concentrados) y alta carga animal. Asimismo, Naranjo *et al.* (2012) estimaron que, en condiciones de alta densidad arbustiva y presencia de árboles en las zonas de pastoreo, el balance entre emisiones y remociones puede llegar a ser negativo, gracias a que en SSPi se pueden capturar entre 17 y 32 t de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹ y emitir cerca de 12 t de CO₂ ha⁻¹ año⁻¹.

En cuanto a las emisiones en praderas con presencia de leucaena, Harrison *et al.* (2015) informaron que estos flujos de gases pueden ser inferiores a los de sistemas convencionales con similar oferta de N en la dieta. En condiciones de bosque seco tropical, Rivera *et al.* (2015) hallaron menores pérdidas de N depositado en estiércol y orina por bovinos en forma de N₂O en un sistema silvopastoril intensivo, respecto a un sistema tradicional ($p = 0,002$). Así, en el SSPi solo se emitió el 1,37 % del N excretado vía estiércol, comparado con el 1,77 % emitido en el sistema tradicional; mientras que para el caso de la orina las emisiones fueron de 3,47 vs. 0,3 % para el sistema tradicional y el SSPi, respectivamente. Al observar los flujos de las praderas, estos mismos autores encontraron que las emisiones de un sistema con leucaena fueron similares a las de un bosque

($p > 0,05$) y muy inferiores a las de un sistema de gramíneas en monocultivo con riego y fertilización ($p = 0,001$). En sus resultados, la alta intensidad de fertilización en el sistema convencional ($420 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y el riego, indudablemente, favorecieron las condiciones para incrementar procesos de desnitrificación y, por ende, las emisiones netas de N_2O hacia la atmósfera.

Mecanismos que explican las respuestas productivas y las emisiones de CH_4 con la presencia de *L. leucocephala*

Desde el punto de vista nutricional, un aspecto a tener en cuenta en este tipo de especies es su degradabilidad, indicador que describe la cantidad de nutrientes verdaderamente disponibles para los animales. Makkar (2003) y Mota *et al.* (2005) señalaron que, si bien leucaena no es de alta digestibilidad debido a la presencia de metabolitos secundarios, como los taninos condensados, su combinación con gramíneas incrementa la degradabilidad de la mezcla forrajera si se compara con los valores individuales de cada especie, lo cual aumenta la disponibilidad de nutrientes para ser utilizados a nivel ruminal y por el animal. De igual forma, autores como Barahona-Rosales *et al.* (2000), Molina *et al.* (2013) y Gaviria *et al.* (2015a) hallaron valores de degradabilidad por encima del 60 %, lo que evidencia posibles efectos ambientales que afectan las características nutricionales de *L. leucocephala*. Es común observar aumentos de un 10 % en la digestibilidad cuando se incluye *L. leucocephala* junto con gramíneas como *M. maximus* o *C. plectostachyus*.

Aunque la degradabilidad de la arbustiva puede parecer poca, su presencia contribuye a una mayor cantidad de N tanto en el rumen como en el duodeno, dado que realiza un aporte considerable de proteína total como de sobrepaso. Esto conlleva un balance de N para la síntesis de proteína microbiana y para satisfacer las necesidades del animal (Mota *et al.*, 2005). La degradabilidad *in vitro* de la proteína de leucaena varía entre 47,8 (García *et al.*, 2009) y 66,9 % (Gaviria *et al.*, 2015b).

Finalmente, en relación con la dinámica de fermentación a nivel ruminal de la leucaena, diferentes autores informan propiedades que contribuyen al mejor desempeño animal y aprovechamiento de los recursos forrajeros. Sommart *et al.* (2000) sugirieron que el volumen de gas es un buen parámetro para predecir la degradabilidad y la síntesis de proteína microbiana en el rumen. Además,

se ha demostrado que la digestibilidad de la MS y de la materia orgánica (MO) tiene una alta correlación con el volumen de gas producido. Huang *et al.* (2011), Molina *et al.* (2013), Rivera *et al.* (2013) y Rivera *et al.* (2015) reportaron que cuando *L. leucocephala* u otras arbustivas son mezcladas con gramíneas hay una mayor producción de gas en horarios tempranos, lo cual favorece una mayor cantidad de sustratos de rápido aprovechamiento por microorganismos presentes en el rumen y, por ende, una mayor eficiencia.

Se ha sugerido que lo que ejerce más influencia en la emisión de metano en el tracto gastrointestinal es la composición de la dieta, en particular el valor proteico y el lipídico y el tipo de carbohidratos (Ulyatt y Lassey, 2001); seguido de elementos como la especie forrajera, el estado de madurez, los métodos de conservación, los tratamientos químicos o físicos (Tan *et al.*, 2011) y la presencia de metabolitos secundarios (Archimède *et al.*, 2011), que intervienen directa o indirectamente en la digestibilidad, la tasa de pasaje, el nivel de consumo y el peso vivo del animal (Singh *et al.*, 2014). Como se discutió anteriormente, en la mayoría de estos factores la inclusión de *L. leucocephala* genera beneficios, lo que a su vez explica por qué con esta leguminosa se emite menos metano durante la fermentación entérica.

Uno de los mecanismos mediante los cuales la inclusión de *L. leucocephala* puede inhibir la producción de metano es su contenido de taninos condensados (TC), que son polifenoles con la capacidad de unirse y precipitar las proteínas, los carbohidratos y otras moléculas (Haslam, 1986). Considerados componentes vegetales antihérvorica, la mayoría de los estudios en nutrición animal con TC fueron inicialmente realizados para caracterizar el impacto de estos sobre la disponibilidad de proteína y energía en animales que consumían leguminosas taníferas (Barahona-Rosales *et al.*, 2000).

A medida que se avanzó en la investigación, se pudieron identificar taninos con efectos nutricionales beneficiosos (vgr *Lotus corniculatus* L.) o deletéreos (vgr *Lotus uliginosus* Schkuhr), los cuales fueron asociados después con diferencias en el peso molecular de los taninos de ambas especies (Foo *et al.*, 1997). En una comparación de siete leguminosas tropicales, Barahona-Rosales *et al.* (2006) demostraron que los taninos de diferentes leguminosas variaban en sus efectos inhibitorios sobre la actividad de las enzimas celulolíticas y hemicelulolíticas, en respuesta a cambios en su contenido de antocianidinas y su peso molecular.

Uno de los avances más significativos de los últimos años es que la presencia de taninos condensados en leguminosas puede contribuir a una reducción en las emisiones de CH₄ entre el 13 y el 16 % (Patra y Saxena, 2010). Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, dichas disminuciones han ido acompañadas con reducciones de la digestibilidad de la fibra, lo cual contrarresta el beneficio de la reducción en emisiones, al afectar negativamente la productividad en respuesta a la limitada disponibilidad de energía a partir de la fibra del forraje. En los estudios de Barahona-Rosales *et al.* (2000) y Barahona-Rosales *et al.* (2006), se demostró que los TC de *L. leucocephala* son de carácter beneficioso, a diferencia de la gran mayoría de los taninos de otras leguminosas tropicales, que actúan más como agentes antinutricionales (tabla 7).

Al evaluar los TC de *L. leucocephala* híbrido Rendang, Tan *et al.* (2011) hallaron que la producción de metano *in vitro* de *M. maximum* se redujo linealmente entre el 1 y el 3 %, en presencia de niveles crecientes de TC. Por su parte, Sallam *et al.* (2010), cuando evaluaron los TC de varias leguminosas entre las que se encontraba leucaena, identificaron que

los taninos podrían reducir hasta en 88 % la producción de metano *in vitro*. El efecto de los TC es atribuido a la acción indirecta sobre la metanogénesis, por la reducción de la producción de H₂ resultante de la degradación de MO y por la acción directa sobre las bacterias metanogénicas. De igual forma Tavendale *et al.* (2005) informaron que los TC pueden reducir hasta el 12 % las poblaciones de bacterias metanogénicas, y Puchala *et al.* (2012) lograron identificar reducciones en las poblaciones de protozoos; aunque Angarita *et al.* (2015) no encontraron efecto de la presencia de taninos de leucaena en la población de bacterias metanogénicas.

Como se puede observar en la tabla 7, a pesar de contener casi la misma cantidad de taninos ligados, solubles y totales en su forraje que el promedio de las otras leguminosas, el forraje de *L. leucocephala* fue 1,57 veces más degradable y tuvo mayor acumulación de ácidos grasos volátiles ($p < 0,05$) cuando fue fermentado en experimentos de producción de gas (Barahona-Rosales *et al.*, 2000). Al evaluar la capacidad de taninos purificados de las mismas leguminosas, con el fin de inhibir la degradabilidad *in vitro* de varios sustratos o la actividad de

Tabla 7. Comparación de características nutricionales y fermentativas de *L. leucocephala* con las de otras leguminosas tropicales

Ítem	<i>L. leucocephala</i>	Otras leguminosas
Contenido de taninos (% de la materia seca)*		
Solubles	2,42	2,52
Ligados	7,76	7,24
Totales	10,18	9,76
Características de la fermentación*		
Ácido acético (mmol)	28,29	20,93
Ácido propiónico (mmol)	9,28	7,36
Ácido butírico (mmol)	2,25	1,64
Ácidos grasos volátiles totales (mmol)	41,92	31,00
Desaparición <i>in vitro</i> de la materia seca (%)	61,96	39,36
Características de los taninos purificados		
Peso molecular (Dalton)**	2370	4010
Inhibición de la degradación de glucosa (%)***	19,50	30,56
Inhibición de la degradación de paredes celulares (%)***	6,63	21,71
Inhibición de la actividad de carboximetilcelulasa (%)***	57,25	75,56
Inhibición de la actividad de xilanasa (%)***	86,77	91,77
Inhibición de la actividad de esterasa de ácido ferúlico (%)***	38,85	81,43

*Barahona-Rosales *et al.* (2000), **Barahona-Rosales (1999), ***Barahona-Rosales *et al.* (2006). Otras leguminosas: *Calliandra calothyrsus*, *Clitoria fairchildiana* R.A. Howard, *Desmodium ovalifolium* (Sw.) DC., *Flemingia macrophylla*, *Leucaena macrophylla* y *Leucaena pallida*.

varias enzimas hidrolíticas producidas por el hongo anaeróbico *Neocallimastix hurleyensis* Vavra & Jonyon ex I.B.Heath, en la mayoría de las ocasiones se observaron las menores reducciones en estos parámetros en presencia de taninos de *L. leucocephala* (Barahona-Rosales *et al.*, 2006).

Es importante destacar que fueron precisamente los taninos de *L. leucocephala* los que mostraron el menor peso molecular en el experimento de Barahona-Rosales *et al.* (2006) (tabla 7). El peso molecular de *L. leucocephala* sugiere una molécula que, en promedio, tiene ocho antocianidinas (i.e. pelargonidina, delfinidina, fisetinidina, entre otras). Debido a su menor peso molecular, los taninos de *L. leucocephala* no son tan eficientes cuando se unen y precipitan la proteína y otros nutrientes, ya que no están disponibles para los microorganismos en el rumen de los bovinos (Barahona-Rosales *et al.*, 2006). De ahí que, entre las leguminosas evaluadas, *L. leucocephala* fue la de más alta degradabilidad y la de mayor producción de ácidos grasos volátiles. Esto sugiere que si los taninos de *L. leucocephala* participan en la reducción de emisión entérica de metano, probablemente lo hacen por mecanismos de toxicidad hacia los microorganismos del dominio *Archaea*.

Consideraciones finales

Los SSPi que empleen leucaena constituyen una alternativa ventajosa para incrementar la producción de carne y leche entre dos y cinco veces más por unidad de área, ya que en ellos se produce un mayor aporte de MS, PC, energía y algunos minerales, así como un menor contenido de FDN y FDA, y una mayor eficiencia en la fermentación ruminal.

Por otra parte, debido a la oferta de biomasa, en los SSPi con leucaena se puede emplear una mayor carga animal (hasta cuatro veces más que en un sistema convencional degradado y hasta dos veces que en uno con pasturas mejoradas), y se obtienen productos de mejor calidad. Además, como consecuencia de la notable eficiencia en la fermentación ruminal y la menor dependencia de insumos externos, como fertilizantes y alimentos concentrados comerciales, se genera un 15 % menos de emisiones de GEI por unidad de producto y alrededor del 20 % menos por kilogramo de MS consumida o degradada. Tales características podrían favorecer a estos sistemas para ingresar a mercados que demanden productos pecuarios bajos en carbono que contribuyan a mejorar la salud humana.

En cuanto a perspectivas de investigación, se recomienda ampliar el conocimiento en temas como calidad bioactiva de los productos animales para perfilarlos como productos nutraceuticos, determinar el impacto de estos sistemas en emisiones de GEI provenientes del suelo y excreciones animales, y realizar evaluaciones económicas detalladas en diferentes condiciones de producción. Además, se recomienda evaluar la captura de carbono y los efectos beneficiosos sobre la salud del suelo y la fauna asociada.

Referencias bibliográficas

- Angarita, Erika; Molina, Isabel; Villegas, G.; Mayorga, Olga; Chará, J. & Barahona, R. Quantitative analysis of rumen microbial populations by qPCR in heifers fed on *Leucaena leucocephala* in the Colombian Tropical Dry Forests. *Acta Sci., Anim. Sci.* 37 (2):135-142. <http://www.scielo.br/pdf/asas/v37n2/1807-8672-asas-37-02-00135.pdf>, 2015.
- AOAC. *Animal feed. Determination of ash content by ashing*. 942.05. 18 ed. Gaithersburg, USA: AOAC International, 2005.
- Archimède, H.; Eugène, M.; Magdeleine, Marie; Boval, M.; Martin, C.; Morgavi, D. P. *et al.* Comparison of methane production between C₃ and C₄ grasses and legumes. *Anim. Feed Sci. Technol.* 59-64:166-167, 2011.
- Barahona-Rosales, R. *Condensed tannins in tropical forage legumes: their characterisation and study of their nutritional impact from the standpoint of structure-activity relationships*. PhD Thesis. United Kingdom, University of Reading, 1999.
- Barahona-Rosales, R.; Lascano, C. E.; Narvaez, N.; Owen, E.; Morris, P. & Theodorou, M. K. *In vitro* degradability of mature and immature leaves of tropical forage legumes differing in condensed tannin and non-starch polysaccharide content and composition. *J. Sci. Food Agric.* 83 (12):1256-1266, 2000.
- Barahona-Rosales, R. & Sánchez, S. Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. *Revista CORPOICA*. 6 (1):69-82. <http://www.redalyc.org/pdf/4499/449945018010.pdf>, 2005.
- Barahona-Rosales, R.; Sánchez, Solange; Lascano, C. E.; Owen, E.; Morris, P. & Theodorou, M. K. Effect of condensed tannins from tropical legumes on the activity of fibrolytic enzymes from the rumen fungus *Neocallimastix hurleyensis*. *Enzyme Microb. Tech.* 39 (2):281-288, 2006.
- Boval, M. & Dixon, R. M. The importance of grasslands for animal production and other functions: a review on management and methodological

- progress in the tropics. *Animal*. 6 (5):748-762, 2012.
- Broom, D. M.; Galindo, F. A. & Murgueitio, E. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *P. Roy. Soc. Lond. B Bio*. 2025:1471-2954. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/royprsb/280/1771/20132025.full.pdf>, 2013.
- Cajas-Girón, Yazmín S.; Cuesta, P. A.; Arreaza-Tavera, L. C. & Barahona-Rosales, R. Implementación de estrategias tecnológicas para mejorar la productividad y sostenibilidad de sistemas de doble propósito en las sabanas de la región Caribe colombiana. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* 24 (3):495, 2011.
- Cuartas, C. A.; Naranjo, J. F.; Tarazona, A.; Correa, G. & Barahona-Rosales, R. Dry matter and nutrient intake and diet composition in *Leucaena leucocephala* - based intensive silvopastoral systems. *Trop. Subtrop Agroecosyst.* 18:303-311. <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2125/991>, 2015b.
- Cuartas, C. A.; Naranjo, J. F.; Tarazona, A. M.; Barahona-Rosales, R.; Rivera, J. E.; Arenas, F. *et al.* Valor nutritivo y cinética de fermentación *in vitro* de mezclas forrajeras utilizadas en sistemas silvopastoriles intensivos. *Zootecnia Trop.* 33 (4):295-306, 2015a.
- Cuartas, C. A.; Naranjo, J. F.; Tarazona, A. M. & Barahona, R. Uso de la energía en bovinos pastoreando sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* y su relación con el desempeño animal. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*. 8 (1):70-81. <http://revistas.ces.edu.co/index.php/mvz/article/view/2858/2065>, 2013.
- Cuartas, C. A.; Naranjo, J. F.; Tarazona, A. M.; Murgueitio, E.; Chará, J. D.; Ku Vera, J. *et al.* Contribution of intensive silvopastoral systems to the adaptation and mitigation of climate change. *Rev. Cienc. Pecu.* 27:76-94. <http://rccp.udea.edu.co/index.php/ojs/article/viewFile/920/1048>, 2014.
- Foo, L. Y.; Lu, Y.; McNabb, W. C.; Waghorn, G. & Ulyatt, M. J. Proanthocyanidins from *Lotus pedunculatus*. *Phytochemistry*. 45:1689-1696, 1997.
- García, D. E.; Wencomo, Hilda B.; Medina, María G.; Moratino, P. & Cova, L. J. Caracterización de la calidad nutritiva de 53 accesiones del género *Leucaena* en condiciones tropicales. *Pastos y Forrajes*. 32 (1):65-80. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v32n1/pyf06109.pdf>, 2009.
- Gaviria-Urbe, Xiomara; Naranjo-Ramírez, J. F.; Bolívar-Vargas, D. & Barahona-Rosales, R. Consumo y digestibilidad en novillos cebuinos en un sistema silvopastoril intensivo. *Arch. Zootec.* 64 (245):21-27. http://www.uco.es/organiza/servicios/publica/az/php/img/web/17_09_57_03_12_3311_4.pdf, 2015c.
- Gaviria, Xiomara; Naranjo, J. F. & Barahona-Rosales, R. Cinética de fermentación *in vitro* de *Leucaena leucocephala* y *Megathyrus maximus* y sus mezclas, con o sin suplementación energética. *Pastos y Forrajes*. 38 (1):55-63. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000100006, 2015a.
- Gaviria, Xiomara; Naranjo, J. F. & Barahona-Rosales, R. Nutritional quality and fractionation of carbohydrates and protein in the forage components of an intensive silvopastoral system. *Pastos y Forrajes*. 38 (2):194-201. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942015000200007, 2015b.
- Gaviria, Xiomara; Sossa, C. P.; Chará, J.; Barahona-Rosales, R.; Lopera, J. J. & Córdoba, C. P. Producción de carne bovina en sistemas silvopastoriles intensivos en el trópico bajo colombiano. *Memorias VII Congreso Latinoamericano de sistemas agroforestales para la producción animal sostenible*. Belém do Pará, Brasil. p. 661-665, 2012. https://www.researchgate.net/publication/262936613_Produccion_de_Carne_Bovina_en_Sistemas_Silvopastoriles_Intensivos_en_el_Tropico_Bajo_Colombiano, 2012.
- González, J. M. Costos y beneficios de un sistema silvopastoril intensivo (SSPi), con base en *Leucaena leucocephala* (Estudio de caso en el municipio de Tepalcatepec, Michoacán, México). *RIA*. 17 (3):35-50. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83728497004>, 2013.
- Harrison, M. T.; McSweeney, C.; Tomkins, N. W. & Eckard, R. J. Improving greenhouse gas emissions intensities of subtropical and tropical beef farming systems using *Leucaena leucocephala*. *Agr. Syst.* 136:138-146, 2015.
- Haslam, E. Hydroxybenzoic acid and the enigma of gallic acid. In: E. E. Conn, ed. *The Shikimic acid Pathway, recent advances in Phytochemistry*. New York: Plenum Press. vol. 20. p. 163-200, 1986.
- Havlik, P.; Valin, H.; Mosnier, A.; Obersteiner, M.; Baker, J. S.; Herrero, M. *et al.* Crop productivity and the global livestock sector: Implications for land use change and greenhouse gas emissions. *Am. J. Agric. Econ.* 95 (2):442-448, 2013.
- Haydock, K. P. & Shaw, N. H. The comparative yield method for estimating dry matter yield of pasture. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* 15 (76):663-670, 1975.
- Huang, X. D.; Liang, J. B.; Tan, H. Y.; Yahya, R. & Ho, Y. W. Effects of *Leucaena* condensed tannins of differing molecular weights on *in vitro* CH₄ production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 166-167:373-376, 2011.
- ICONTEC. *Alimentos y materias primas. Determinación de los contenidos de grasa y fibra cruda.*

- NTC 668. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1973.
- ICONTEC. *Alimento para animales. Determinación del contenido de nitrógeno y cálculo del contenido de proteína cruda. Método Kjeldahl*. NTC 4657. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 1999.
- ICONTEC. *Alimento para animales. Determinación de los contenidos de calcio, cobre, hierro, magnesio, manganeso, potasio, sodio y zinc. Método usando espectrometría de absorción atómica*. NTC 5151. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2013.
- ISO. *Animal feeding stuffs, animal products, and faeces or urine-Determination of gross calorific value-Bomb calorimeter method*. ISO 9831. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 1998.
- Mahecha, Liliana; Corral, Gabriela; Murgueitio, María M.; Sánchez, C.; Ángulo, J.; Olivera, Martha et al. Calidad de carne SSPi en Colombia y México. *Carta Fedegan*. 129:60-65. <http://es.slideshare.net/Fedegan/carta-fedegan-129>, 2012.
- Makkar, H. P. *Quantification of tannins in tree and shrub foliage. A laboratory manual*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- Mauricio, R. M.; Mould, F. L.; Dhanoa, M. S.; Owen, E.; Channa, K. S. & K., Theodorou, M. A semiautomated *in vitro* gas production technique for ruminant feeds tuff evaluation. *Anim. Feed Sci. Technol.* 79 (4):321-330, 1999.
- Mayes, R. W.; Lamb, C. S. & Colgrove, Patricia M. The use of dosed and herbage n-alkanes as markers for the determination of herbage intake. *J. Agric. Sci.* 107 (1):161-170, 1986.
- Mohammed, A. H. M.; Aguilar-Pérez, C. F.; Ayala-Burgos, J.; Bottini-Luzardo, María B.; Solerio-Sánchez, F. J. & Ku-Vera, J. C. Evaluation of milk composition and fresh soft cheese from an intensive silvopastoral system in the tropics. *Dairy Sci. Technol.* 96 (2):159-172, 2015.
- Molina, I. C.; Angarita, E. A.; Mayorga, O. L.; Chará, J. & Barahona-Rosales, R. Effect of *Leucaena leucocephala* on methane production of Lucerna heifers fed a diet based on *Cynodon plectostachyus*. *Livest. Sci.* 185:24-29, 2016.
- Molina, I. C.; Cantet, J. M.; Montoya, S.; Correa, G. & Barahona-Rosales, R. *In vitro* methane production from two tropical grasses alone or in combination with *Leucaena leucocephala* or *Gliricidia sepium*. *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*. 8 (2):15-31. <http://www.scielo.org.co/pdf/cmzv/v8n2/v8n2a02.pdf>, 2013.
- Molina, I. C.; Donney's, G.; Montoya, S.; Rivera, J. E.; Villegas, G.; Chará, J. et al. La inclusión de *Leucaena leucocephala* reduce la producción de metano de terneras Lucerna alimentadas con *Cynodon plectostachyus* y *Megathyrsus maximus*. *LRRD*. 27 (5). <http://www.lrrd.org/lrrd27/5/moli27096.html>, 2015.
- Montoya, C.; García, J. F. & Barahona-Rosales, R. Contenido de ácidos grasos en carnes de bovinos cebados en diferentes sistemas de producción en el trópico colombiano. *Revista de la Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias*. 22 (3):205-214, 2015.
- Mota, M.; Rodríguez, R.; Solanas, E. & Fondevila, M. Evaluation of four tropical browselegumes as nitrogen sources: comparison of *in vitro* gas production with other methods to determine N degradability. *Anim. Feed Sci. Technol.* 123-124 (1):341-350, 2005.
- Murgueitio, E.; Calle, Zoraida; Uribe, F.; Calle, Alicia & Solorio, B. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecol. Manag.* 261 (10):1654-1663, 2011.
- Murgueitio, E.; Xóchitl, M.; Calle, Zoraida; Chará, J.; Barahona-Rosales, R.; Molina, C. H. et al. Productividad en sistemas silvopastoriles intensivos en América Latina. En: Florencia Montagnini, E. Somarrriba, E. Murgueitio, H. Fassola y B. Eibl, eds. *Sistemas agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Turrialba, Costa Rica, Cali, Colombia: CATIE, CIPAV. p. 59-101, 2015.
- Naranjo, J. F.; Cuartas, C. A.; Murgueitio, E.; Chará, J. & Barahona-Rosales, R. Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *LRRD*. 24 (8). <http://www.lrrd.org/lrrd24/8/nara24150.htm>, 2012.
- Paciullo, D. S.; Pires, M. F.; Aroeira, L. J.; Morenz, M. J.; Mauricio, R. M.; Gomide, C. A. et al. Sward characteristics and performance of dairy cows in organic grass-legume pastures shaded by tropical trees. *Animal*. 8 (8):1264-1271, 2014.
- Patra, A. K. & Saxena, J. A new perspective on the use of plant secondary metabolites to inhibit methanogenesis in the rumen. *Phytochemistry*. 71:1198-1222, 2010.
- Puchala, R.; Animut, G.; Patra, A. K.; Detweiler, G. D.; Wells, J. E.; Varel, V. H. et al. Methane emissions by goats consuming *Sericea lespedeza* at different feeding frequencies. *Animal*. 175 (1-2):76-84, 2012.
- Rivera, J. *Análisis del ciclo de vida (ACV) en un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) y un sistema intensivo convencional orientados a la producción de leche bajo condiciones de bs - T*. Tesis de Maestría: Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2015.

- Rivera, J.; Cuartas, C. A.; Naranjo, J. F. & Barahona-Rosales, R. Comparación del comportamiento productivo y calidad de la leche en vacas bajo un sistema silvopastoril intensivo y un sistema de producción convencional en el valle del Río Cesar. *Rev. colomb. Cienc. Pecu.* 22 (3):514, 2009.
- Rivera, J.; Chará, J. & Barahona-Rosales, R. Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema intensivo convencional bajo condiciones de bosque seco tropical. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 19 (3):237-251, 2016.
- Rivera, J.; Molina, I. C.; Donney's, G.; Villegas, G.; Chará, J. & Barahona-Rosales, R. Dinámica de fermentación y producción de metano en dietas de sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* y sistemas convencionales orientados a la producción de leche. *LRRD.* 27 (4). <http://www.lrrd.org/lrrd27/4/rive27076.html>, 2015.
- Rivera, J.; Naranjo, J. F.; Cuartas, C. A. & Arenas, F. A. Fermentación *in vitro* y composición química de algunos forrajes y dietas ofrecidas bajo un sistema silvopastoril en el trópico de altura. *LRRD.* 25 (10). <http://www.lrrd.org/lrrd25/10/rive25174.htm>, 2013.
- Sallam, S. M.; Bueno, I. C.; Godoy, P. B.; Nozella, E. F.; Vitti, D. M. & Abdalla, A. L. Ruminant fermentation and tannins bioactivity of some browses using a semi-automated gas production technique. *Trop. Subtrop. Agroecosyst.* 12 (1):1-10. <http://www.redalyc.org/pdf/939/93913074001.pdf>, 2010.
- Singh, S.; Anele, U. Y.; Edmunds, B. & Südekum, K. H. *In vitro* ruminal dry matter degradability, microbial efficiency, short chain fatty acids, carbohydrate and protein fractionation of tropical grass-multipurpose tree species diets. *Livest. Sci.* 160:45-51, 2014.
- Sommart, K.; Parker, D. S.; Rowlinson, P. & Wanapat, M. Fermentation characteristics and microbial protein synthesis in an *in vitro* system using cassava, rice straw and dried ruzi grass as substrate. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 13 (8):1084-1093, 2000.
- Sossa, Claudia P.; Correa, G. A. & Barahona-Rosales, R. Consumo y excreción de nutrientes en novillos de carne pastoreando en trópico de altura con y sin suplementación energética. *Zootecnia Trop.* 33 (2):117-128, 2015.
- Tan, H. Y.; Sieo, C. C.; Abdullah, N.; Liang, J. B.; Huang, X. D. & Ho, Y. W. Effects of condensed tannins from *Leucaena* on methane production, rumen fermentation and populations of methanogens and protozoa *in vitro*. *Anim. Feed Sci. Technol.* 169 (3-4):185-193, 2011.
- Tavendale, M. H.; Lane, G. A.; Schreurs, Nicola M.; Fraser, K. & Meagher, Lucy P. The effects of condensed tannins from *Dorycnium rectum* on skatole and indole ruminal biogenesis for grazing sheep. *Aust. J. Agric. Res.* 56 (12):1331-1337, 2005.
- Ulyatt, M. J. & Lasey, K. R. Methane emissions from pasture systems: the situation in New Zealand. *Arch. Latinoam. Prod. Anim.* 9 (1):118-126, 2001.

Recibido el 21 de marzo del 2017

Aceptado el 1 de julio del 2017