



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y SERVICIO EN
ZOOTECNIA**

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

**ESTUDIO DE SISTEMAS SILVOPASTORILES DIVERSIFICADOS
EN EL TRÓPICO MEXICANO**

TESIS

Que como requisito parcial

para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

LAURA KAREN TREJO ARISTA

Bajo la supervisión de: **ENRIQUE CORTÉS DÍAZ, DR.**



Chapingo, México, mayo de 2023



**ESTUDIO DE SISTEMAS SILVOPASTORILES DIVERSIFICADOS EN EL
TRÓPICO MEXICANO**

Tesis realizada por **LAURA KAREN TREJO ARISTA** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

DIRECTOR: _____



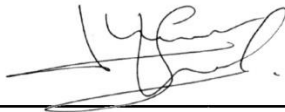
DR. ENRIQUE CORTÉS DÍAZ

ASESOR: _____



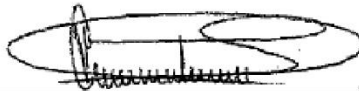
Ph.D. PEDRO ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

ASESOR: _____



Ph.D. MAXIMINO HUERTA BRAVO

LECTOR EXTERNO: _____



DR. CLAUDIO VITE CRISTÓBAL

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN GENERAL	14
1.1	Literatura citada	18
2.	SISTEMAS SILVOPASTORILES UNA ESTRATEGIA PARA CONFORMAR EMPRESAS GANADERAS RESILIENTES: UNA REVISIÓN ..	21
2.1	Resumen	21
2.2	Abstract.....	21
2.3	Introducción	22
2.4	La salud del suelo en SSP.....	23
2.5	El papel de los sistemas silvopastoriles en la mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI)	30
2.6	Biodiversidad en los SSP.....	35
2.7	Aporte de los SSP al bienestar animal.....	37
2.8	Aporte de los SSP para la producción de forraje disponible	39
2.9	Conclusiones	42
2.10	Agradecimientos.....	42
2.11	Conflicto de intereses	42
2.12	Referencias bibliográficas.....	42
3.	POTENCIAL FORRAJERO DE ARBÓREAS NATIVAS DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA EN EL ALTO BALSAS	54
3.1	Resumen	54
3.2	Abstract.....	54
3.3	Introducción	55
3.4	Materiales y métodos.....	57

3.4.1	Área de estudio y gestión del muestreo de arbóreas nativas	57
3.4.2	Procesamiento de las muestras y análisis de la información	60
3.5	Resultados y Discusión.....	61
3.6	Conclusión	76
3.7	Agradecimientos	76
3.8	Conflicto de intereses	76
3.9	Referencias bibliográficas.....	76

LISTA DE CUADROS

SISTEMAS SILVOPASTORILES UNA ESTRATEGIA PARA CONFORMAR EMPRESAS GANADERAS RESILIENTES: UNA REVISIÓN

Cuadro 1. Aportes de los SSP al suelo.....27

Cuadro 2. Aporte de los SSP a la reducción de las emisiones de GEI.32

POTENCIAL FORRAJERO DE ARBÓREAS NATIVAS DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA EN EL ALTO BALSAS

Cuadro 1. Porcentaje de materia seca (MS) y concentraciones en base seca de proteína cruda (PC), cenizas (Ce), fibras detergentes neutro (FDN) y ácido (FDA) y minerales en especies vegetales en los sitios agostadero de montaña (AM), agostadero del caporal (AC) y sistema silvopastoril (SSP) en El Limón, Tepalcingo, Morelos63

Cuadro 2. Grupos de variables del valor nutritivo de forrajes en el Limón, Tepalcingo, Morelos; según su similitud65

LISTA DE FIGURAS

POTENCIAL FORRAJERO DE ARBÓREAS NATIVAS DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA EN EL ALTO BALSAS

Figura 1. Distribución de transectos en El Limón, Tepalcingo, Morelos.....59

Figura 2. Dendograma para identificar la similitud entre las variables del valor
nutritivo de forrajes en El Limón, Tepalcingo, Morelos64

ABREVIATURAS USADAS

AC: agostadero del caporal
AM: agostadero de montaña
B: biomasa
BA: biomasa aérea
BH: biomasa de hojarasca
BR: biomasa de raíces
Ce: cenizas
CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico
CO: carbono orgánico
DA: densidad aparente
DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca
FDA: fibra detergente ácida
FDN: fibra detergente neutro
GEI: gases de efecto invernadero
MO: materia orgánica
MSF: microorganismos solubilizadores de fosfatos
NE: no especificada(o)
NO: nivel óptimo
NT: nivel máximo tolerable
PC: proteína cruda
RMPR: resistencia mecánica a la penetración de las raíces
S: suelo
SSA: sistema(s) sin árboles
SSP: sistema(s) silvopastoril(es)
T: tratamiento
To: total
TV: tejido vegetal

DEDICATORIAS

A todas y todos los campesinos que día con día cuidan la vida.

A la memoria de mis abuelitos que han trascendido dejándome todo su amor y enseñanzas.

A mi familia y amigos por su amor y apoyo siempre.

A Kira y Gordo   por su amor y contención en los momentos difíciles.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, por los recursos proporcionados para la realización de este trabajo y los estudios de doctorado, pero sobre todo por recibirme con todo el cariño del mundo cual si de una madre se tratase y proveerme de todos los medios para cumplir mis sueños.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca de manutención proporcionada que me permitió seguir estudiando.

Al ejido El Limón por compartir sus experiencias y permitirme desarrollar este trabajo en su comunidad. En especial a la familia Benítez Bahena por el apoyo brindado para la realización de esta investigación, por abrirme las puertas de su casa y tratarme como si fuese parte de su familia.

Al Ing. Tonatiuh González por su amistad, su apoyo incondicional, su paciencia y por todas las facilidades brindadas para la realización de la fase de campo de este estudio en la Sierra de Huautla. A todos los colaboradores de Wild Forest Consulting por su apoyo en la realización de todos los muestreos.

Al Dr. Enrique Cortés Díaz por su amistad, por sus invaluable enseñanzas, por su comprensión y paciencia, así como el apoyo brindado en todo momento desde mi llegada al posgrado.

Al Ph.D. Pedro Arturo Martínez Hernández por todas sus enseñanzas y su aporte para la realización de este trabajo.

Al Ph.D. Maximino Huerta Bravo por su paciencia, por sus enseñanzas y por su contribución para la elaboración de este trabajo.

Al Posgrado en Producción Animal por recibirme con apertura y cariño, a mis maestros por la paciencia y las enseñanzas compartidas y a mis compañeros por su amistad y su apertura para apoyarme en los momentos en que lo requerí.

A Fabian y a Pedro por su amistad y su apoyo en la supervisión del trabajo en el laboratorio. A Danahe, Alexis, Fernando y Abigail por su amistad, su paciencia y su apoyo en el laboratorio.

A mis amigos Miguel, Mario, David, Miel y Pablo por su cariño, su apoyo en el trabajo de campo y toda la motivación que me brindaron para poder concluir el posgrado.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Laura Karen Trejo Arista
Fecha de nacimiento: 21 de octubre de 1990
Lugar de nacimiento: Toluca, México, México
CURP: TEAL901021MMCRRR02
Profesión: Ingeniero en Agroecología
Cédula profesional: 11529639

Desarrollo académico

Ingeniero en Agroecología (2013)
Licenciatura: Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio
en Agroecología
Universidad Autónoma Chapingo
Maestro en Ciencias en Innovación Ganadera (2016)
Maestría: Posgrado en Producción Animal
Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

ESTUDIO DE SISTEMAS SILVOPASTORILES DIVERSIFICADOS EN EL TRÓPICO MEXICANO

Ante la degradación de la cubierta vegetal ocasionada por el sobrepastoreo y el establecimiento de monocultivos en zonas ganaderas con manejo convencional, los sistemas silvopastoriles (SSP) y la mejora de agostaderos basados en la inclusión de arbóreas nativas, son alternativas para mejorar la productividad y la sostenibilidad de las empresas ganaderas. Las familias de la Sierra de Huautla en el Alto Balsas subsisten de sistemas ganaderos que propician el pastoreo extensivo de bovinos en el agostadero nativo, lo que ha generado en el paisaje áreas degradadas cada vez mayores. Para enfatizar la importancia de migrar hacia sistemas más diversos, mediante una revisión de literatura científica, se destacaron los beneficios de los SSP; además, con el muestreo de dos sitios del agostadero y un SSP se evaluó el valor nutritivo de las arbóreas que los pobladores refirieron como consumidas por el ganado. Como resultado, se constató el efecto de los SSP en la mejora de las propiedades del suelo, en la reducción de las emisiones de CO₂ y CH₄, en la generación de alimento y refugio para los animales silvestres, su función como zonas de confort para el ganado que promueven su bienestar, y su influencia en el rendimiento y calidad de las herbáceas asociadas. En el agostadero de una comunidad del Alto Balsas, se encontraron especies arbóreas con potencial forrajero en términos de valor nutritivo y consumo por el ganado. Se concluyó que los SSP promueven la sostenibilidad y que las especies arbóreas nativas con potencial forrajero podrían mejorar la aptitud del agostadero como recurso alimenticio para el ganado bovino, al considerarlas para la reforestación de este y en el diseño de SSP para áreas degradadas, siempre y cuando se realice la suplementación de Se, Na, Cu y Zn mediante el ofrecimiento de una premezcla al ganado.

Palabras clave: arbóreas nativas, valor nutritivo, agostadero.

GENERAL ABSTRACT

STUDY OF DIVERSIFIED SILVOPASTORAL SYSTEMS IN THE MEXICAN TROPICS

Given the degradation of vegetation cover caused by overgrazing and the establishment of monocultures in livestock areas with conventional management, silvopastoral systems (SSP) and the improvement of rangelands based on the inclusion of native trees are alternatives to improve the productivity and sustainability of livestock enterprises. The families of Sierra de Huautla in the Alto Balsas subsist on livestock systems that encourage extensive cattle grazing in the native rangeland, which has generated increasingly degraded areas in the landscape. To emphasize the importance of migrating to more diverse systems, through a review of scientific literature, the benefits of SSP were highlighted. In addition, with the sampling of two range sites and a SSP, the nutritional value of trees that inhabitants referred to as consumed by cattle was evaluated. As a result, the effect of SSP was documented in the improvement of soil properties, in the reduction of CO₂ and CH₄ emissions, in the generation of food and shelter for wild animals, their function as comfort zones for cattle that promote their well-being, and their influence on performance and quality of associated herbaceous plants. In the rangeland of a community in the Alto Balsas, tree species with fodder potential in terms of nutritional value and consumption by cattle were found. It was concluded that SSP promote sustainability, and native tree species with fodder potential could improve the range's suitability as a food resource for cattle when considering them for reforestation and in the design of SSP for degraded areas, as long as Se, Na, Cu, and Zn supplementation is carried out by offering a premix to cattle.

Keywords: native trees, nutritional value, rangeland.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La selva baja caducifolia es un tipo de vegetación del trópico mexicano en donde se desarrolla ampliamente la ganadería extensiva con ganado bovino, las áreas en donde esto se lleva a cabo se han denominado agostaderos nativos (Aguilar-Jiménez et al., 2023; Rodríguez-Moreno, Nahed-Toral, Guevara-Hernández, Alayón-Gamboa, & Grande-Cano, 2020). En esta modalidad de producción suele darse el sobrepastoreo debido a la carencia de manejo. Esto origina que con el paso del tiempo en el paisaje se observen superficies cada vez mayores con disminución de la cubierta vegetal. La inclusión de arbóreas nativas en empresas ganaderas, a través del establecimiento de sistemas silvopastoriles planificados o mediante el enriquecimiento de agostaderos nativos, se ha reconocido como una estrategia para recuperar la cubierta vegetal degradada (Escobar et al., 2020; Peña-Domene et al., 2022; Viruel et al., 2021). Esto promueve la mejora de indicadores de producción y la generación de servicios ambientales en dichas empresas (Casasola, Ibrahim, Sepúlveda, Ríos, & Tobar, 2009; Gallego, Mahecha, & Angulo, 2017; López, 2005).

Pachas (2017) y Ramírez, Sandoval, Ku Vera y Estrada (2005) mencionaron que las empresas ganaderas tropicales priorizan el uso de gramíneas forrajeras en sistemas monófitos pese al generalizado bajo valor nutritivo y disponibilidad irregular de esas especies, condiciones ocasionadas por la estacionalidad de las precipitaciones y altas temperaturas en el trópico. De manera similar, Alonso (2011) señaló que la degradación de las pasturas y su baja sostenibilidad son algunos de los problemas principales de estos sistemas. En esquemas de producción que contemplan una mayor diversidad de vegetación, como los sistemas silvopastoriles (SSP), se da el desarrollo armónico de especies leñosas, semileñosas y herbáceas, así como animales integrados en los ecosistemas que los acogen, por lo que han constituido una de las modalidades más promisorias de los sistemas de producción de alimentos en el plano económico, social y por supuesto, ambiental (Alonso, 2011; Murgueitio, Chará, Barahona, Cuartas, & Naranjo, 2014).

Con este estudio se espera contribuir al fortalecimiento de la producción pecuaria en ecosistemas de selva baja caducifolia en el altiplano mexicano, a través de la definición del potencial forrajero de arbóreas nativas que en un futuro pudieran ser candidatas para su inclusión en sistemas silvopastoriles planificados y para la reforestación de agostaderos, promoviendo su mejora como recurso alimenticio para los bovinos. En este sentido, Dagang y Nair (2003), Palma (2006) y Pezo e Ibrahim (1998) mencionaron que la inclusión de arbóreas en empresas ganaderas representa una opción para incrementar la productividad y reducir el impacto negativo de estos sistemas. Esos mismos autores señalaron que esta alternativa permite incorporar leñosas o semileñosas perennes (árboles o arbustos) en interacción con los componentes tradicionales (herbáceas y animales), en un esquema de manejo integral.

En diferentes estudios se han observado mejoras en la productividad mediante la inclusión de arbóreas en empresas ganaderas. Rivera et al. (2015) estimaron que en un sistema silvopastoril que incluyó *Leucaena leucocephala* asociada a pasturas mejoradas con la presencia de árboles dispersos, se emitió 8 % menos $\text{CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ MS consumida}$, que en un sistema convencional basado en *Cynodon plectostachyus*. Por otra parte, Alonso, Valenciaga, Sampaio y Demolin (2007) evaluaron un sistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala* cv. Perú y *Panicum maximum* cv. Likoni con edades de establecimiento de 3, 4, 5 y 6 años de uso y observaron que la macrofauna del suelo fue en aumento, con una dominancia de lombrices y coleópteros a partir del 5º año. Así mismo, Bacab y Solorio (2011) compararon dos sistemas de *Leucaena leucocephala*-*Megathyrsus maximus* var. Tanzania y árboles dispersos de *Mangifera indica* con un monocultivo de *Cynodon nlemfuensis* y los resultados evidenciaron una mayor oferta de forraje comestible en los sistemas silvopastoriles (2470 y 2693 kg MS ha^{-1} pastoreo) respecto al monocultivo (948 kg MS ha^{-1} pastoreo).

Las arbóreas forrajeras tienen una mayor cantidad de proteína cruda que los pastos normalmente utilizados en la ganadería extensiva. En un sistema de *Leucaena leucocephala*, *Megathyrsus maximus* var. Tanzania y *Cynodon*

plectostachyus, Gaviria-Uribe, Naranjo-Ramírez, Bolívar-Vergara y Barahona-Rosales (2015) reportaron un contenido de proteína cruda de 26.1 % para la arbórea, 8.7 % para *Megathyrsus maximus* var. Tanzania y 10.1 % para *Cynodon plectostachyus*. A su vez, se han observado ventajas de las asociaciones con arbóreas en los sistemas silvopastoriles. En este sentido, Ribaski y Menezes (2002) compararon el valor nutritivo de *Cenchrus ciliaris* asociado a *Prosopis juliflora* y en monocultivo, demostrando que el pasto presentó mayor cantidad de proteína bruta al estar asociado (8.44 vs 7.43 %).

En la Sierra de Huautla, región con ecosistema de selva baja caducifolia ubicada en la parte alta de la cuenca hidrológica del Balsas, se han realizado diferentes estudios en el ámbito de la inclusión de arbóreas en los sistemas ganaderos. Hasta ahora solo se ha utilizado a *Leucaena* spp. como árbol forrajero, lo cual es limitante considerando que González y López (2008) encontraron 21 especies con alto potencial forrajero para animales domésticos y 44 especies con alto potencial forrajero para fauna silvestre en la región. A su vez, Trejo (2016) determinó que algunas especies nativas de la Sierra de Huautla como *Lysiloma divaricata*, *Ipomoea murucoides*, *Guazuma ulmifolia*, *Acacia cochliacantha* y *Leucaena collinsii* presentaron niveles de proteína cruda entre 15 y 20 %, digestibilidad *in vitro* de la materia seca entre 65 y 77 % y destacaron por su contenido de minerales que se encontraban deficientes en suero sanguíneo de ovinos de la región, tales como Ca, Mg, Na y Zn. Hernández et al. (2011) mencionaron que esas especies están entre las 10 más abundantes de la Sierra de Huautla, por lo que González y López (2008) y Trejo (2016) las consideraron especies con potencial forrajero para animales domésticos. Lo anterior indica que es necesario evaluar minuciosamente el potencial forrajero de las arbóreas nativas de la región, para generar información detallada que permita considerarlas en el diseño de SSP y programas de reforestación del agostadero nativo, con lo cual, se puedan diversificar los sistemas de producción y aprovechar el potencial de la zona.

El presente estudio se desarrolló en dos fases, la primera mediante la revisión de literatura científica sobre la relevancia de los sistemas silvopastoriles para la sostenibilidad de las empresas ganaderas y la segunda mediante la evaluación del valor nutritivo de especies arbóreas nativas referidas por los pobladores de una comunidad con selva baja caducifolia en la Sierra de Huautla como consumidas por el ganado, para con ello, inferir si se trataba de especies con potencial forrajero.

La hipótesis del estudio fue la siguiente:

La selva baja caducifolia de la parte alta de la cuenca hidrológica del Balsas contiene especies arbóreas cuyo follaje puede presentar valor forrajero para animales domésticos debido a las concentraciones de proteína cruda, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y minerales (Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn) que contienen.

Los objetivos del estudio fueron:

Proporcionar un banco de información objetiva acerca de la influencia de la conformación y manejo de sistemas silvopastoriles como áreas de apacentamiento, sobre indicadores asociados a empresas ganaderas con alta producción pecuaria y ofertantes de servicios ecosistémicos, lo que implica resiliencia ambiental y económica a través de una revisión amplia y análisis detallado de información científica disponible.

Determinar las concentraciones de proteína cruda (PC), cenizas (Ce), fibras detergentes neutro (FDN) y ácido (FDA) y minerales en el follaje de arbóreas nativas de la cuenca alta del Balsas, identificadas por los pobladores como consumidas por el ganado bovino.

En el Capítulo 2 se presenta una revisión sobre el impacto de los sistemas silvopastoriles en la sostenibilidad de las empresas ganaderas. En el Capítulo 3 se muestra un estudio en el que se determinaron las concentraciones de PC, Ce, FDN, FDA y minerales de arbóreas que se encuentran en el agostadero nativo

de El Limón (comunidad con selva baja caducifolia en la Sierra de Huautla), las cuales, mediante una metodología participativa, fueron referidas por los pobladores como consumidas por el ganado en tres sitios de muestreo, sistema silvopastoril, agostadero de montaña y agostadero de caporal.

1.1 Literatura citada

Aguilar-Jiménez, J. R., Aguilar-Jiménez, C. E., Guevara-Hernández, F., Galdámez-Galdámez, J., Martínez-Aguilar, F., La O-Arias, M. A., Mandujano-Camacho, H., Abarca-Acero, M. A., & Nahed-Toral, J. (2023). Clasificación y caracterización de los sistemas familiares de producción bovina de la región frailesca de Chiapas, México, con base en el aporte de la ganadería al ingreso familiar. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(1), 17.

Alonso L., J., Valenciaga V., N., Sampaio, R. A., & Demolin L., G. L. (2007). Diversidad zoológica asociada a un silvopastoreo leucaena-guinea con diferentes edades de establecimiento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, 1667-1674.

Alonso L., J. (2011). Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45, 107-115.

Bacab P., H. M., & Solorio S., F. J. (2011). Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 271-278.

Casasola, F., Ibrahim, M., Sepúlveda, C., Ríos, N., & Tobar, D. (2009). Implementación de sistemas silvopastoriles y pago de servicios ambientales en Esparza, Costa Rica: una herramienta para la adaptación al cambio climático en fincas ganaderas. En Ibrahim M., & C. Sepúlveda (Eds.). *Políticas y sistemas de incentivos para el fomento y adopción de buenas prácticas agrícolas como una medida de adaptación al cambio climático en América Central*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. (pp. 169-188, Turrialba, Costa Rica).

Dagang, A. B. K. and Nair, P. (2003). Silvopastoral research and adoption in Central America: recent findings and recommendations for future directions. *Agroforestry Systems*, 59, 149–155.

Escobar, M. I., Navas, P. A., Medina, C. A., Corrales, A. J. D., Tenjo, A. I., & Borrás, S. L. M. (2020). Efecto de prácticas agroecológicas sobre características del suelo en un sistema de lechería especializada del trópico alto colombiano. *Livestock Research for Rural Development*, 32(4).

Gallego, L. A., Machecha, L., & Angulo A., J. (2017). Calidad nutricional de *Tithonia diversifolia* Hemsl. A Gray bajo tres sistemas de siembra en el trópico alto. *Agronomía Mesoamericana*, 28, 213-222.

Gaviria-Urbe, X., Naranjo-Ramírez, J. F., Bolívar-Vergara, D. M., & Barahona-Rosales, R. (2015). Consumo y digestibilidad en novillos cebuínos en un sistema silvopastoril intensivo. *Archivos de Zootecnia*, 64, 21-27.

González B., G. T., & López A., L. A. (2008). *Flora del pastizal tropical de la selva baja caducifolia*. (Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México).

Hernández S., D. A., Cortés D., E., Zaragoza R., J. L., Martínez H., P. A., González B., G. T., Rodríguez C., B., & Hernández S., D. A. (2011). Hábitat del venado cola blanca en la Sierra de Huautla, Morelos, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 27, 47-66.

López, M. (2005). *Procesos del fomento tecnológico de bancos de proteína de Gliricidia sepium en Rivas, Nicaragua: resultados bioeconómicos y lecciones aprendidas para su difusión*. (Tesis de maestría, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica).

Murgueitio R., E., Chará O., J., Barahona R., R., Cuartas C., C., & Naranjo R., J. (2014). Los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17, 501-507.

Pachas A., N. A. (2017). *A study of water use of leucaena*. (Doctoral thesis, University of Queensland, Queensland, Australia).

Palma, J. M. (2006). Los sistemas silvopastoriles en el trópico seco mexicano. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 14, 95-104.

Peña-Domene, M., Ayestarán-Hernández, L. M., Márquez-Torres, J. F., Martínez-Monroy, F., Rivas-Alonso, E., Carrasco-Carballido, P. V., Pérez-Cruz, M. N., Chang, L. F. A., & Martínez-Garza, C. (2022). Sistemas silvopastoriles enriquecidos: una propuesta para integrar la conservación en la producción ganadera en comunidades rurales de Los Tuxtlas, México. *Acta Botánica Mexicana*, 129, e1925.

Pezo, D., & Ibrahim, M. (1998). *Sistemas silvopastoriles. Módulo de Enseñanza Agroforestal No. 2. Colección Módulos de Enseñanza Agroforestal*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

Ramírez, L., Sandoval, C., Ku Vera, J., & Estrada, J. (2005). Integración del componente arbóreo en los sistemas de producción animal tropical. En E. Velasco, R. Pinto, & B. Martínez (Eds.). *Primer Simposium Internacional de Forrajes Tropicales en la Producción Animal*, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Ribaski, J., & Menezes, E. de A. (2002). Disponibilidad y calidad del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris*) en un sistema silvopastoril con algarrobo (*Prosopis juliflora*) en la región semi-árida Brasileña. *Agroforestería en las Américas*, 9, 8-13.

Rivera, J. E., Molina, I. C., Donney's, G., Villegas, G., Chará, J., & Barahona, R. (2015). Dinámica de fermentación y producción 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, 1-15.

Rodríguez-Moreno, O. G., Nahed-Toral, J., Guevara-Hernández, F., Alayón-Gamboa, J. A., & Grande-Cano, J. D. (2020). Historia y caracterización técnica y socioeconómica de la ganadería bovina en la costa de Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(55), 55.

Trejo A., L. K. (2016). *Comportamiento productivo de ovinos en un sistema silvopastoril de Leucaena leucocephala asociado a Megathyrsus maximus var. Mombasa versus agostadero*. (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México).

Viruel, E., Fontana, C. A., Bassi, D., Puglisi, E., Radrizzani, A. B., Martinez, C. L., Banegas, N. R., Cocconcelli, P. S. (2021). Silvopastoral systems in dry Chaco, Argentina: Impact on soil chemical parameters and bacterial communities. *Soil use and management*, 37(4), 866-878.

2. SISTEMAS SILVOPASTORILES UNA ESTRATEGIA PARA CONFORMAR EMPRESAS GANADERAS RESILIENTES: UNA REVISIÓN

Silvopastoral systems a strategy to build resilient livestock enterprises: a review

Laura Karen Trejo-Arista¹, Enrique Cortés-Díaz^{1*}, Pedro Arturo Martínez-Hernández¹ & Maximino Huerta-Bravo¹

¹*Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texoco, 56230, México.*

**Correspondencia: ecodia@yahoo.com.mx*

2.1 Resumen

Ante la degradación de ecosistemas ocasionada por los sistemas convencionales de producción pecuaria, los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa viable para su restauración al contribuir a su sostenibilidad. En este trabajo se destacaron los beneficios de los SSP en cinco ejes: preservación de la salud del suelo, mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), conservación de la biodiversidad, promoción del bienestar animal y mejora de la productividad de forraje. Se discutió sobre su efecto en la mejora de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, en la reducción de las emisiones de CO₂ y CH₄, en la generación de recursos alimenticios y refugio para los animales silvestres, su función como zonas de confort para el ganado bovino que propician su bienestar, y, su impacto en el rendimiento y valor nutritivo de las herbáceas asociadas. Se concluyó que los SSP se consideran sistemas ganaderos que promueven la sostenibilidad.

Palabras clave: suelo, mitigación, biodiversidad, valor nutritivo.

2.2 Abstract

Given the degradation ecosystems caused by conventional livestock production systems, silvopastoral systems (SSP) are a viable alternative for their restoration by contributing to their sustainability. In this work, the benefits of SSP were highlighted in five axes: they had soil health, mitigation of greenhouse gas (GEI) emissions, biodiversity conservation, promotion of animal welfare and improvement of forage productivity. The discussion centered on its effect on improving the physical, chemical, and microbiological properties of soil, on reduction of CO₂ and CH₄ emissions, generation of food resources and shelter for wild animals, its function as comfort zones for cattle that positively impact their welfare, and their positive effect on performance and nutritional value of associated herbaceous plants. It was concluded that SSPs are considered livestock systems that promote sustainability.

Keywords: soil, mitigation, biodiversity, nutritional value.

2.3 Introducción

La gestión de empresas ganaderas pastoriles basada en un ambiente pobre en especies vegetales y rico en la aplicación de insumos externos para erradicar especies vegetales y animales ‘no ganaderas’ y promover el máximo rendimiento posible de unas cuantas especies vegetales ‘pertinentes’ a la alimentación del ganado, se ha asociado a la generación de ecosistemas frágiles de pobre resiliencia ambiental y económica (Gómez *et al.*, 2019; Pérez-Sánchez *et al.*, 2021). La fragilidad ambiental se origina en la escasa biodiversidad vegetal y animal que permite la degradación de los suelos, extinción de biomas vegetales ante condiciones climáticas extremas, interrupción de cadenas simbióticas mutualistas, incremento de la huella hídrica, entre otras (Steinfeld *et al.*, 2009; Rodríguez-Moreno *et al.*, 2020; Yalta *et al.*, 2021). A su vez, la fragilidad económica proviene de un costo de producción a merced de los vaivenes en los costos de los insumos externos cada vez más necesarios para mantener o mejorar el nivel de producción de la empresa ganadera (Aguilar-Jiménez *et al.*, 2023; Rodríguez-Moreno *et al.*, 2020; Steinfeld *et al.*, 2009).

La FAO e ITPS (2015) y El Bilali *et al.* (2019) definieron a la sostenibilidad como el desarrollo que permite satisfacer las necesidades presentes sin vulnerar la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades. Superficies de biodiversidad vegetal amplia son ecosistemas resilientes ambiental y económicamente, debido a que la biodiversidad vegetal favorece relaciones mutualistas que a su vez promueven suelos saludables, premisa fundamental para una producción vegetal sustentable (Gutiérrez-Bermúdez *et al.*, 2020; Lehmann, *et al.*, 2020; Saleem *et al.*, 2019). Superficies pastoriles o de apacentamiento con biodiversidad vegetal planificada con incorporación de especies herbáceas, semileñosas y leñosas de portes medios a altos, son referidas como SSP y han sido señaladas como una opción en el diseño e implantación de empresas ganaderas resilientes (Díaz *et al.*, 2020; Peña-Domene *et al.*, 2022).

Los SSP pueden ser una opción en el manejo de los recursos naturales para revertir daños a ecosistemas perturbados por actividad humana al establecer ecosistemas de escasa biodiversidad vegetal y animal en la búsqueda de un máximo rendimiento (Gerber *et al.*, 2013; González-Valdivia *et al.*, 2018). Gómez *et al.* (2019), Peña-Domene *et al.* (2022) y Saleem *et al.* (2019) enfatizaron que las empresas agropecuarias además de la obtención de satisfactores de consumo y uso antropocéntrico directo deben atender la provisión de servicios

ecosistémicos: agua limpia, formación de suelo saludable, microclima por cobertura aérea vegetal, polinización, entre otros.

La planificación adecuada de los componentes vegetales de un SSP promueve suelos saludables capaces de producir mayores cosechas por abundante biología, biodiversidad vegetal y animal extensa, mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, bienestar animal y resiliencia de empresas ganaderas (Camero-Rey y Rodríguez-Díaz, 2015; Deniz *et al.*, 2021; Escobar *et al.*, 2017; González-Valdivia *et al.*, 2018; Oyelami y Osikabor, 2022; Vásquez *et al.*, 2020). Sin embargo, es necesario compendiar y analizar críticamente las evidencias científicas sobre la conformación y manejo de los SSP para lograr impactos ambientales positivos a la vez de empresas ganaderas resilientes y sostenibles (Améndola *et al.*, 2016; Hanisch *et al.*, 2019). El objetivo de esta revisión de literatura científica fue proporcionar un banco de información objetiva acerca de la influencia de la conformación y manejo de SSP como áreas de apacentamiento sobre indicadores asociados a empresas ganaderas con alta producción pecuaria y ofertantes de servicios ecosistémicos lo que implica resiliencia ambiental y económica.

2.4 La salud del suelo en SSP

La gestión sostenible del suelo está basada en el mantenimiento y/o mejoramiento de su salud a través del tiempo, evitando comprometer los servicios de sostén que brinda al ecosistema (FAO e ITPS, 2015; Karlen *et al.*, 1997). La salud del suelo se puede evaluar mediante el estado de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas (Acevedo *et al.*, 2021; Cabrera *et al.*, 2021; Castillo-Valdez, *et al.* 2021; García *et al.*, 2012; Karlen *et al.*, 1997). Esas propiedades, funcionan como indicadores de la salud del suelo, pues el manejo de este recurso en los sistemas de producción las altera de manera importante, principalmente cuando los ingresos de energía son menores que los egresos (Castillo-Valdez, *et al.* 2021). En este sentido, la compactación, salinización, acidificación, pérdida de nutrientes y/o materia orgánica se consideran tipos de degradación del suelo y hacen referencia a la alteración de sus propiedades (FAO e ITPS, 2015).

Uno de los principales problemas generados por las empresas ganaderas convencionales que se ha caracterizado ampliamente, es la degradación del suelo. A ese respecto, Camero-Rey y Rodríguez-Díaz (2015), Silva-Olaya *et al.* (2022) y Viruel *et al.* (2021) mencionaron que, en los suelos con condiciones de degradación, los SSP ayudan a utilizar mejor la tierra pues la

integración de árboles de uso múltiple favorece el reciclaje de nutrientes y mejora las condiciones ambientales. En el ámbito de los SSP se han realizado diversos estudios para conocer el impacto de estos sobre la calidad del suelo en términos de propiedades químicas, físicas y microbiológicas.

En cuanto a las propiedades físicas, en el Cuadro 1 se observa que, en el suelo de SSP, Contreras-Santos *et al.* (2019) encontraron una densidad aparente (DA) y una resistencia mecánica a la penetración de las raíces (RMPR) menores hasta en un 25 y 37% respectivamente, en comparación al suelo de un sistema sin árboles (SSA). A su vez, Oliva *et al.* (2016) cuyos resultados se presentan en el mismo cuadro, observaron una tendencia similar en la DA del suelo de SSP que al igual que la compactación, fueron menores hasta en 31 y 65% respectivamente, en comparación con el suelo de un SSA. Al respecto, Romero *et al.* (2021) señalaron que debido a la utilización que hacen de especies leñosas, las cuales presentan un mayor desarrollo radicular que las herbáceas, los SSP tienen un efecto directo en la mejora de los niveles de agregación y estructuración de los suelos. Lo anterior se puede ver reflejado en la mejora de las propiedades físicas del suelo, tales como DA, compactación y RMPR (Contreras-Santos *et al.*, 2019; Oliva *et al.*, 2016).

En el Cuadro 1 se presentan otros estudios donde la implementación de SSP tuvo un efecto positivo sobre el mantenimiento de las propiedades del suelo descritas anteriormente. Bugarín *et al.* (2010) estimaron que tras 14 meses de evaluación de un SSP la DA se mantuvo pese al pisoteo de ovinos. Por su parte, Escobar *et al.* (2020) no encontraron diferencias en la RMPR al comparar las áreas bajo los árboles de un SSP con las áreas abiertas, que presentaron una profundidad del suelo 54% mayor. Cabe mencionar que, en los SSP, bajo las copas de los árboles suelen registrarse temperaturas más bajas que en las áreas abiertas, lo cual genera un microclima más adecuado para los animales y estos suelen descansar en estas áreas a diversas horas del día (Deniz *et al.*, 2020). A causa de ello, el pisoteo en esas zonas incrementa, lo que puede generar una mayor compactación del suelo (Escobar *et al.*, 2020; Romero *et al.*, 2021). Esto justifica que puedan encontrarse suelos de menor profundidad bajo las copas de los árboles en los SSP, sin embargo, es alentador que parámetros como la DA y la RMPR se mantengan a pesar del pisoteo (Bugarín *et al.*, 2010; Escobar *et al.*, 2020).

Referente a las propiedades químicas, el Cuadro 1 muestra que autores como Bueno y Camargo (2015), Crespo y Fraga (2002) y Oliva *et al.* (2016) han estimado aportes de macro

y micronutrientes al suelo por parte de los sistemas silvopastoriles, vía hojarasca y/o fijación biológica del nitrógeno por medio de la utilización de arbóreas leguminosas. Esos resultados muestran que los SSP tienen un efecto positivo en la mejora de la fertilidad del suelo, lo cual, también fue constatado por Escobar *et al.* (2020) cuyos resultados mostrados en el cuadro antes mencionado, refieren una saturación de bases (K, Ca y Mg) hasta 54% mayor en áreas bajo árboles de 30 años que en áreas abiertas y bajo árboles de ocho años. Lo anterior, permite inferir que cuanto más tiempo se mantenga el suelo bajo un manejo silvopastoril, su fertilidad irá mejorando. Toledo (2016) y Vargas *et al.* (2020) han considerado a la saturación de bases como una de las propiedades que determinan la fertilidad del suelo.

Otro aspecto importante para determinar la salud del suelo es el estado de la materia orgánica (MO), de ella dependen la mayoría de las funciones del ecosistema suelo, las cuales, son esenciales para el secuestro de carbono (C), la mineralización del nitrógeno (N), la agregación, el fomento de la salud de las plantas y la retención de agua y nutrientes (Cruz-Macías *et al.*, 2020; Hoffland *et al.*, 2020, Núñez-Ravelo *et al.*, 2021). A este respecto, en el Cuadro 1 se observa que autores como Bugarín *et al.* (2010), Camero-Rey y Rodríguez-Díaz (2015), Escobar *et al.* (2020), Hernández *et al.* (2008) y Oliva *et al.* (2016) documentaron los beneficios de los SSP sobre la cantidad de MO del suelo, ya sea al compararlos con SSA y obtener mejores resultados en los SSP o por incrementar su contenido a través del tiempo. Lo mencionado se puede asociar al aporte de residuos de biomasa por parte de las especies arbóreas incluidas en los SSP, lo que se ha documentado por Crespo y Fraga (2002). En este sentido, se ha señalado que la MO del suelo proviene de la descomposición microbiana de residuos de biomasa vegetal (hojarasca, exudados y residuos de raíces) y animal, por lo que un mayor aporte de estos es fundamental para su regeneración e incremento (Haddix *et al.*, 2020; Núñez-Ravelo *et al.*, 2021).

Otra propiedad química que mejoró en los SSP fue el contenido de carbono orgánico (CO) del suelo, pues como se muestra en el Cuadro 1, al respecto Contreras-Santos *et al.* (2019), Escobar *et al.* (2020) y Oliva *et al.* (2016) observaron un incremento hasta en un 70, 12 y 47% respectivamente, en los suelos con manejo SSP en comparación con suelos de SSA. Entre los autores citados, además, Contreras-Santos *et al.* (2019) estimaron al menos 18 veces más biomasa de raíces finas en suelos de SSP en comparación con un SSA. Lo anterior hace referencia a lo discutido por Sanderman *et al.* (2017) quienes constataron que, en suelos con mayor diversidad de plantas y productividad de biomasa, el almacenaje de CO aumentó, en

comparación con áreas con manejo convencional. A tal efecto, Haddix *et al.* (2020) mencionaron que un menor almacenaje de CO puede vulnerar a largo plazo la sostenibilidad de la producción de alimentos y contribuir al cambio climático. A su vez Lok *et al.* (2013), mencionaron que el carbono almacenado en el suelo puede fungir como un indicador de la eficiencia, estabilidad y el funcionamiento de los sistemas forrajeros, pues conjuga los efectos del manejo, tipo de suelo, vegetación presente y la actividad biológica. Es por ello que, debido a su efecto positivo en el almacenaje de CO, los SSP contribuyen a la sostenibilidad.

Cuadro 1. Aportes de los SSP al suelo.

Estudio	Componentes de SSP		Densidad de especie arbórea	Aportes a las propiedades del suelo			Tratamientos y comparaciones
	Arbórea(s)	Herbácea(s)		Físicas	Químicas	Microbiológicas	
Bueno y Camargo (2015)	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	NE	10,000 plantas/ha		Aportó en 7 meses 250 kg de N/ha		No se comparó con SSA
Bugarín et al. (2010)	<i>L. leucocephala</i> (Ll) y <i>Leucaena glauca</i> (L.) Benth. (Lg)	<i>Urochloa brizantha</i> (A.Rich.) R.D.Webster (Ub) y <i>Clitoria ternatea</i> L. (Ct)	2,500 plantas/ha en todos los SSP	Se mantuvo la DA (1.33 g/cm ³) pese al pisoteo de ovinos.	En T1, T2 y T3, a los 14 meses de establecimiento de los SSP, incrementó de: -MO de 1.68 a 1.94% -pH de 6.3 a 6.7 en promedio		4 SSP: T1 (Ll+Ub) T2 (Lg+Ub) T3 (Ll+Ub+Ct) T4 (Lg+Ub+Ct) 1 SSA: T5(Ub)
Caicedo et al. (2018)	2 SSP; T1: <i>Alnus acuminata</i> Kunth T2: <i>Acacia melanoxylon</i> R.Br.	Mezcla forrajera de gramíneas en ambos SSP	NE			9 taxones en cada SSP y 10 en T3. Haplotaxida con mayor abundancia relativa en los 3 tratamientos (>66.5%). Acorde al índice de Shannon - Wiener, T2 tuvo mayor diversidad (1.161), seguido de T3 (0.924) y por último T1 (0.902). Acorde al índice de Simpson, T2 fue el mayor (0.531), seguido de T1 (0.396) y T3 (0.394).	T3: SSA con mezcla forrajera de gramíneas.
Camero-Rey y Rodríguez-Díaz (2015)	<i>Erythrina berteroana</i> Urb.	<i>U. brizantha</i> cv. Toledo CIAT 26110	Producción de biomasa arbórea: 2,724 kg MS/ha/año		Mayor cantidad de MO en el SSP vs SSA (1.70 vs 1.20%)	Mayor cantidad de lombrices de tierra en el SSP vs SSA (315 vs 262 lombrices/m ²)	SSA de <i>U. brizantha</i> cv. Toledo CIAT 26110
Contreras-Santos et al. (2019)	4 SSP (T1, T2, T3 y T4) con combinaciones de arbustos y árboles forrajeros y maderables.	<i>Megathyrus maximus</i> (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs cv. Mombasa en los 4 SSP	39 árboles/ha en todos los SSP	Menor DA en los 4 SSP a los 20 cm de profundidad (1.16 - 1.22 g/cm ³) que en T5 (1.54 g/cm ³).	Mayor acumulación de CO en los 4 SSP (60.6 - 65.1 t/ha) que T5 (38.3 t/ha). Mayor biomasa de raíces finas a los 20 cm de		T1: pastura + arbustos forrajeros T2: pastura + árboles forrajeros T3: pastura + arbustos forrajeros + árboles forrajeros

				Menor RMPR a los 20 cm de profundidad en los 4 SSP (1.93 - 2.26 MPa) que en T5 (3.07 MPa).	profundidad en los 4 SSP (288.1 - 1864.7 kg/ha) que en T5 (15.37 kg/ha).	T4: pastura + arbustos forrajeros + árboles forrajeros + árboles maderables T5: pastura sin árboles
Crespo y Fraga (2002)	<i>Cajanus cajan</i> (L.) Millsp.	<i>Cynodon nlemfuensis</i> Vanderyst	3300 plantas/ha		En 5 meses aportó vía hojarasca: 973 g MS/arbusto = 63, 10, 44, 30 y 6 kg/ha de N, P, K, Ca y Mg respectivamente En 4 meses aportó vía hojarasca: 2871 g MS/árbol = 11, 1, 7, 9, y 1 kg/ha de N, P, K, Ca y Mg respectivamente	No se compararon con SSA
	<i>Albizia lebbbeck</i> (L.) Benth.	<i>C. nlemfuensis</i>	100 plantas/ha			
Escobar et al. (2017)	SSP (T1) con <i>Guazuma ulmifolia</i> Lam., <i>Vachellia pennatula</i> (Schltdl. & Cham.) Seigler & Ebinger, <i>Psidium guajava</i> L., <i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp. y <i>Caesalpinia velutina</i> (Britton & Rose) Standl.	<i>Andropogon gayanus</i> Kunth	Distribución espacial de árboles dispersos y cercas vivas.		Valores similares en los tres tratamientos de: -pH (6.16 - 6.36) -MO (4.12 - 5.27%) -N (0.2 - 0.26%) -P (6.01 - 6.41 ppm) -CIC (36.9 - 47.2 Meq/100 g suelo)	T1 con mayor abundancia de macrofauna (4231 individuos) y riqueza (24 órdenes) que T2 (2664 individuos y 22 órdenes) y T3 (2985 individuos y 23 órdenes). El índice de Shannon (H') fue mayor en T3 (1.93) que en T1 (1.68) y T2 (1.69).
Escobar et al. (2020)	Árboles de 8 y 30 años de <i>A. acuminata</i>	<i>Cenchrus clandestinus</i> (Hochst. ex Chiov.) Morrone	35% de cobertura en arreglo de árboles dispersos y cercas vivas.	Menor profundidad del suelo en las áreas bajo los árboles (22 - 25 cm) que en las áreas abiertas (34 cm). No hubo diferencias entre áreas en la RMPR.	Áreas bajo los árboles con mayor cantidad de MO (9.5 - 9.7%) y CO (5.5 - 5.6%) que las áreas abiertas (8.6% de MO y 5% de CO). Bajo árboles de 30 años mayor saturación de bases (K, Ca y Mg; 34.15%) que en áreas abiertas (25.47%) y bajo árboles de 8 años (22.13%).	En el sistema silvopastoril se evaluaron por separado las áreas bajo los árboles de 8 y 30 años y las áreas abiertas. Implementación de prácticas agroecológicas.

Hernández et al. (2008)	2 SSP (T1 y T2): ambos con <i>L. leucocephala</i>	T1: <i>M. maximus</i> . T2: <i>Cynodon plechtostachyus</i> K. (Schum) Pilger.			Mayor cantidad de MO en T1 y T2 (4.4% ambos) que en T3 (3.0%).	Mayor cantidad de taxones en T1 (6) y T2 (7) que en T3 (3).	T3: SSA de pasto natural
Oliva et al. (2016)	2 SSP: T1: <i>Pinus patula</i> Schl. et Cham. T2: <i>A. acuminata</i>	NE	NE	Menor compactación en T4 (61.4 psi), seguido de T1 (136.9 psi) y T2 (141.5 psi), mayor en T3 (395 psi). Menor DA en T4 (0.55 g/cm ³), seguido de T1 (0.69 g/cm ³) y T2 (0.64 g/cm ³), mayor en T3 (0.93 g/cm ³).	Mayores niveles de P en T1 (5.83 ppm) y T2 (5.81 ppm) que en T3 (4.22 ppm) y T4 (5.45 ppm). Mayor cantidad de CO (5.56%), MO (9.58%) y N (0.48%) en T4 seguido de T1 (CO: 5.34%, MO: 9.2% y N: 0.47%) y T2 (CO: 4.76%, MO: 8.2% y N: 0.41%), menor cantidad en T3 (CO: 3.64%, MO: 5.92% y N: 0.31%).		T3: SSA a campo abierto. T4: bosque.

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico. CO: carbono orgánico. DA: densidad aparente. MO: materia orgánica. MSF: microorganismos solubilizadores de fosfatos. NE: no especificada. RMPR: resistencia mecánica a la penetración de las raíces SSA: sistema sin árboles. SSP: sistema silvopastoril. T: tratamiento.

En cuanto a las propiedades microbiológicas, Cabrera *et al.* (2021), Gutiérrez-Bermúdez *et al.* (2020) y Saleem *et al.* (2019) indicaron que un factor fundamental para lograr suelos saludables es la biología del suelo conformada por micro y macro-organismos, estos organismos ejercen el minado, movimiento, retención y recirculación de minerales en el complejo suelo-planta-animal, pero a su vez su funcionamiento y prosperidad dependen de la cantidad y diversidad de la masa radical, por tanto, la biología del suelo demanda una biodiversidad vegetal amplia para originar un perfil del suelo con abundancia y diversidad de la masa radical. En este sentido, en el Cuadro 1, Caicedo *et al.* (2018), Camero-Rey y Rodríguez-Díaz (2015), Escobar *et al.* (2017), Escobar *et al.* (2020) y Hernández *et al.* (2008) estimaron mayor diversidad y/o abundancia de micro y mesofauna edáfica en suelos de SSP en comparación con SSA. La mejora en la parte microbiológica tiene un efecto positivo en la sostenibilidad del sistema, pues la biología del suelo cumple un papel importante en el procesamiento de los residuos orgánicos, lo cual resulta en el almacenaje de MO y CO (Sanderman *et al.*, 2017; Núñez-Ravelo *et al.*, 2021).

2.5 El papel de los sistemas silvopastoriles en la mitigación de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI)

El aumento en la atmósfera de la concentración de gases efecto invernadero como el CO₂ y CH₄ es una preocupación por la relación que tiene con el calentamiento de la superficie terrestre, este calentamiento puede ocasionar drásticos cambios en el patrón climático (IPCC, 2018). En diversos estudios, como los presentados en el Cuadro 2, se ha constatado el potencial de los SSP para llevar a cabo la captura de carbono y con ello contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático (Lok *et al.*, 2013; Oliva *et al.*, 2017; Vásquez *et al.*, 2020). La inclusión de especies arbóreas en esos sistemas incrementa su productividad y con ello el reciclaje de nutrientes (Azuara-Morales *et al.*, 2020; Oliva *et al.*, 2018), lo cual se puede traducir en una mayor captura de carbono en comparación con los SSA. Esto se puede ilustrar con el estudio de Oliva *et al.* (2017; Cuadro 2), quienes estimaron que el componente arbóreo del SSP evaluado aportó el 8.9% del carbono capturado por el sistema, mientras que el herbáceo solo aportó el 1.6%. Por otra parte, Contreras-Santos *et al.* (2023), Landholm *et al.* (2019) y Vásquez *et al.* (2020) mostraron a nivel de sistema que los tratamientos con SSP presentaron capturas de carbono mayores en un 56, 321 y 37%, respectivamente, en comparación con los SSA evaluados (Cuadro 2).

Como se discutió en el apartado anterior, el suelo representa un almacén para el carbono reciclado por las plantas. A este respecto, Contreras-Santos *et al.* (2019) mencionaron que los SSP tienen capacidad para capturar el carbono atmosférico e inmovilizarlo en el suelo, por lo que cobran gran relevancia en la recuperación de suelos degradados y la mitigación de GEI. Esto se puede corroborar con los estudios de Contreras-Santos *et al.* (2023) y Pérez *et al.* (2019) quienes encontraron en el suelo de los SSP una mayor captura de carbono hasta en un 23 y 31%, respectivamente, en comparación con los SSA (Cuadro 2). En ambos trabajos se asoció esta diferencia al aumento en la biomasa de raíces en los SSP dado por el desarrollo de las arbóreas, pues observaron que la captura de carbono en el suelo incrementó proporcionalmente con el aumento de esa biomasa. Con ello, se resalta el papel de las raíces en el ciclo del carbono y la importancia de considerar la inclusión de árboles en el diseño de agroecosistemas por su capacidad de desarrollo radicular.

Cuadro 2. Aporte de los SSP a la reducción de las emisiones de GEI.

Estudio	Tratamientos evaluados	Densidad arbórea (árboles/ ha)	Secuestro (t/ha)		CH ₄	Almacenaje	Tiempo de evaluación	Observaciones
			C	CO ₂				
Contreras-Santos et al. (2023)	SSP de <i>Erythrina fusca</i> Lour., <i>Pachira quinata</i> (Jacq.) W.S.Alverson, <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb., <i>G. ulmifolia</i> , <i>Inga edulis</i> Mart., <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC., <i>Samanea saman</i> (Jacq.) Merr y <i>M. maximus</i> cv. Agrosavia Sabanera	19.0	BA: 2.18 BR: 0.63 BH: 2.51 S: 28.05 To: 33.21			TV, S y sistema	2 años	Mayor acumulación de C en BA y S
	SSP de <i>E. cyclocarpum</i> , <i>E. fusca</i> , <i>Gmelina arborea</i> Roxb., <i>S. saman</i> , <i>G. sepium</i> , <i>Ficus</i> sp y <i>M. maximus</i> cv. Mombasa	81.0	BA: 4.51 BR: 1.16 BH: 3.09 S: 28.98 To: 37.70			TV, S y sistema	2 años	Mayor acumulación de C en BA, BR, BH, S y To
	SSA de <i>Bothriochloa pertusa</i> (L.) A. Camus		BA: 0.19 BR: 0.08 BH: 0.30 S: 23.54 To: 24.12			TV, S y sistema	2 años	Testigo. Menor acumulación de C en BA, BR, BH, S y To
De Bernardi et al. (2020)	Pastizal natural				-9.5 ngCH ₄ /m ² /s	Flujo de CH ₄ en S	NE	Testigo
	Terreno agrícola con <i>Hordeum vulgare</i> L. y <i>Glycine max</i> (L.) Merr.				-4.5 ngCH ₄ /m ² /s	Flujo de CH ₄ en S	NE	Menor captación de CH ₄
	SSP de <i>Pinus radiata</i> D. Don y <i>Dactylis glomerata</i> L.	727.0			-21.3 ngCH ₄ /m ² /s	Flujo de CH ₄ en S	NE	Mayor captación de CH ₄
	Forestación de <i>P. radiata</i>	977.0			-22.5 ngCH ₄ /m ² /s	Flujo de CH ₄ en S	NE	Mayor captación de CH ₄
Landholm et al. (2019)	SSA de pastos degradados (<i>Urochloa spp</i>)			3.4 (1)		Sistema	1 año	Testigo (no se evaluó el secuestro de C)
	SSA de pastos mejorados: <i>M. maximus</i> , <i>Urochloa humidicola</i> (Rendle) Morrone & Zuloaga y <i>Axonopus scoparius</i> (Flügge) Kuhlman.		0.38	1.3 (1)		Sistema	1 año	
	Banco forrajero y pastos mejorados		0.66	2.2 (1)		Sistema	1 año	

	SSP de <i>Calycophyllum spruceanum</i> (Benth.) Hook.f. ex K.Schum., <i>G. arborea</i> , pastos mejorados y banco de forraje	104.0	1.6	0.8 (1)	Sistema	1 año	Mayor secuestro de C y menores emisiones de CO ₂
Lok et al. (2013)	SSP de <i>M. maximus</i> y <i>L. leucocephala</i>	9,014.0	10.9		S	3 años	
	Gramíneas y mezcla de leguminosas rastreras		9.8		S	3 años	
	SSA de <i>M. maximus</i>		-16.7		S	3 años	Se redujo el C en el suelo
Oliva et al. (2017)	Árboles de <i>P. patula</i> asociados a herbáceas nativas	625.0	8.2	30.2	TV	NE	Capacidad de captura de C del 42.7% (15 a 20 días de edad)
	Herbáceas nativas		1.4	5.4	TV	NE	
	Hojarasca		1.1	4.1	TV	NE	
	Suelo		81.2	297.3	S	NE	
	SSP en conjunto		92.1	337.2	Sistema	NE	
Pérez et al. (2019)	SSP de <i>A. acuminata</i> , <i>Acacia decurrens</i> Willd. y <i>C. clandestinus</i>	285.0	BA: 1.9 BR: 2.1		TV de <i>C. clandestinus</i>	1 año	Rendimientos; BA: 3.9 t/ha BR: 4.3 t/ha. Mayor captura de C en BR
	SSA de <i>C. clandestinus</i>		BA: 2.0 BR: 1.6		TV	1 año	Rendimientos; BA: 4.2 t/ha BR: 3.3 t/ha
Vásquez et al. (2020)	SSP de <i>A. acuminata</i> , pastos y malezas	Franjas	B: 6.8 S: 101.3	396.4	TV y S	7 meses	
	SSP de <i>P. patula</i> , pastos y malezas	Franjas	B: 11.7 S: 49.0	589.3	TV y S	7 meses	
	SSP de <i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw. ex Gord., pastos y malezas	Cerco vivo	B: 32.8 S: 17.2	550.2	TV y S	7 meses	
	SSP de <i>Ceroxylon quindiuense</i> (H.Karst.) H.Wendl., pastos y malezas	Árboles dispersos	B: 57.8 S: 121.6	658.0	TV y S	7 meses	Mayor retención de C y CO ₂
	SSA de pastos y malezas		B: 1.7 S: 29.6	481.4	TV y S	7 meses	

(1): emisiones. B: biomasa. BA: biomasa aérea. BH: biomasa de hojarasca. BR: biomasa de raíces NE: no especificado. S: suelo. To: total. TV: tejido vegetal.

Por otro lado, uno de los riesgos de seguir acogiendo a los sistemas de producción convencional, es el aporte que estos realizan a la generación de gases de efecto invernadero (GEI). Esto se demuestra con los resultados obtenidos por Lok *et al.* (2013; Cuadro 2), quienes estimaron que, al cabo de 3 años, en el suelo de un SSA con pasto, se perdieron 16.7 t C/ha, mientras que en el de un SSP se almacenaron 10.9 t C/ha. En otro estudio (Landholm *et al.*, 2019; Cuadro 2) se observó que un SSP tuvo una emisión de CO₂ 76% menor que un SSA de pastos degradados. De Bernardi *et al.* (2020) determinaron que un SSP puede captar 3.7 veces más CH₄ que un terreno agrícola con manejo convencional. Al respecto, los autores comentaron que la capacidad de captación de CH₄ del suelo está relacionada con la difusividad del CH₄, por tanto, se ve influida por la DA, el contenido de agua y la temperatura del suelo. Como se mencionó en el apartado anterior, los SSP pueden influir positivamente en esas propiedades del suelo, por lo que aunado a su efecto sobre la reducción de las emisiones de GEI, contribuyen fuertemente con la sostenibilidad del sistema.

Se ha mencionado que las arbóreas comúnmente usadas en los SSP tienen potencial para reducir las emisiones de CH₄ debido a su valor nutritivo y contenido de metabolitos secundarios. Lo cual, fue comprobado por Berhanu *et al.* (2019) quienes estimaron una mayor concentración de CH₄ en el gas producido *in vitro* por *C. cajan* (52.2%) seguido de rastrojo de maíz (31.7%), *Sesbania sesban* (L.) Merr. (31.0%) y *L. leucocephala* (25.4%), seguidos de *Moringa stenopetala* (Baker fil.) Cufod. (24.1%) y *Crotalaria juncea* L. (23.4%), y, la menor en *Lablab purpureus* (L.) Sweet (16.2%). Los autores mencionaron que la concentración de CH₄ en el gas producido *in vitro* por las especies mencionadas está inversamente relacionada con su capacidad para reducir la producción de CH₄ y con su contenido de proteína cruda. Irawan *et al.* (2020) observaron en un estudio *in vitro* que en una dieta de bovinos basada en *Pennisetum purpureum* Schumacher, la adición de *L. leucocephala* a razón de 500 g/kg y 750 g/kg afectó de manera positiva la fermentación ruminal y redujo la producción de CH₄ hasta en un 54.2%. Esta reducción se asoció a la existencia de taninos en la arbórea, los cuales contribuyen de manera directa por la supresión de metanógenos e indirecta mediante la inhibición del crecimiento de protozoos (Wanapat *et al.*, 2015). La existencia de metabolitos secundarios en arbóreas utilizadas en SSP que pueden contribuir a la reducción de las emisiones de CH₄ fue documentada por Sandoval-Pelcastre (2020), quien recopiló información sobre el contenido de estos compuestos en 20 especies arbóreas.

Con la información que se ha discutido en este apartado, se puede deducir que los SSP contribuyen a la sostenibilidad de los sistemas ganaderos mediante la mitigación de las emisiones de GEI, a la vez que podrían representar un beneficio para los actores sociales. En este sentido, Oliva *et al.* (2017) mencionaron que la captura de carbono realizada por los SSP puede beneficiar a los productores, pues a comparación de los SSA, en muchos países estos reciben estímulos como el pago por servicios ambientales, así mismo, permiten el acceso a otros productos, como madera y leña para uso familiar.

2.6 Biodiversidad en los SSP

La integración de la variabilidad biológica en todos los niveles, desde los recursos genéticos hasta las especies, los ecosistemas y los paisajes, definen al término "biodiversidad", su conservación depende del mantenimiento de la integridad funcional del ecosistema, pues esta es la mejor manera de reducir la pérdida de especies, así mismo, es preciso priorizar la conservación de la biodiversidad con énfasis en la definición de grupos funcionales de organismos, identificados con base en procesos ecosistémicos, que cuenten con la menor redundancia (Pascual *et al.*, 2021; Walker, 1992). Oropesa-Casanova *et al.* (2020) señalaron que, la biodiversidad es un reservorio de recursos genéticos que proporciona diversos servicios ecosistémicos y permite disminuir el uso de insumos externos en los agroecosistemas. Un manejo idóneo de la biodiversidad es clave en el diseño de los sistemas de producción agropecuaria, pues en ella se basa la vida en la tierra y sostenibilidad en los agroecosistemas (Sarandón y Flores, 2014).

En esta vía, González-Valdivia *et al.* (2018) documentaron la diversidad de malacofauna existente en dos SSP tradicionales. Uno en bosque seco, arbustivo y caducifolio, y otro, en bosque de pino-encino, en Estelí, Nicaragua. En conjunto, los sistemas estudiados contenían a 47 de las 216 especies de moluscos terrestres registradas para Nicaragua, 41 de ellas se encontraron en el bosque seco y 22 en el bosque de pino-encino, con 16 en común. Entre las especies identificadas, 13 pueden ser potenciales vectores de enfermedades del ganado o plagas agrícolas. Igualmente, se identificaron cuatro categorizadas como endémicas y dos con potencial para control biológico que son depredadoras de otros caracoles. Así mismo, se determinó que en ambos sistemas prevalecieron especies muy raras (24 y 11 para bosque seco y bosque de pino-encino, respectivamente), seguidas en orden descendente de especies raras, ocasionales y frecuentes. Esto puso de manifiesto que la diversidad de moluscos

depende de la existencia de un estrato arbóreo. Por lo tanto, en potreros y praderas es conveniente contar con ese componente, pues esto puede asegurar la existencia de nichos que den soporte a la diversidad de moluscos. A su vez, al conservar la biodiversidad se da la presencia de cadenas tróficas que pueden favorecer la presencia y vigor de la vegetación que alimenta al ganado y otras que pueden ocasionar daños a la vegetación para la alimentación del ganado. No obstante, la existencia de grupos funcionales de organismos con mayor diversidad favorece la regulación de las funciones que las especies cumplen en los ecosistemas y promueve su conservación (Walker, 1992).

En una finca comercial dedicada a la producción de leche de vaca, luego de varios años de promover una diversidad vegetal planificada en las áreas de pastoreo con la incorporación de *Tithonia diversifolia* (Hemsl.), *C. clandestinus* y *A. acuminata* y otra permitiendo la sucesión vegetal propia del lugar, se establecieron cadenas tróficas benéficas para el crecimiento de especies forrajeras al controlarse la intensidad del ataque de plagas como *Collaria* sp., *Draeculacephala* sp. y *Aeneolamia* sp., a su vez, se mejoró la dieta de las vacas en pastoreo lo que implicó una reducción en la cantidad de suplementos que originó un menor costo de producción (Lopera et al., 2017).

Ordoñez-Solarte et al. (2015) compararon *Coffea arabica* L. en monocultivo y en arreglo agroforestal con *I. edulis* y un SSP *C. clandestinus* - *P. guajava*, con base en censos de aves diurnas. *C. arabica* en monocultivo registró los menores valores en los índices de Shannon, Simpson, número de especies y abundancia de individuos con valores respectivos de: 2.16, 0.88, 9 especies y 202 individuos; mientras que los otros dos arreglos en promedio registraron 2.75, 0.93, 15.5 especies y 426 individuos. Concluyeron los autores que un dosel vegetal de mayor complejidad botánica promueve más nichos para alimentación, refugio y resguardo y en consecuencia abundante biodiversidad que doseles vegetales monoespecíficos.

Marinaro y Grau (2015) en el Chaco argentino encontraron que, en el paisaje ganadero dominado por gramíneas introducidas, el índice Simpson para aves y mamíferos registró mayor variabilidad en comparación con los paisajes ganaderos de pastizal naturalizado y SSP árboles nativos-gramíneas introducidas. Los autores indican a partir de esta experiencia, que la combinación de estratos vegetales: herbáceo, y leñoso a lo largo del paisaje promueve una mayor homogeneidad en la distribución de nichos de alimentación, refugio y resguardo. Por tanto, una mejor distribución de la biodiversidad de animales. Concluyen que la diversidad en

la composición botánica del paisaje ganadero fomenta una distribución homogénea de las especies de animales a través de la superficie ocupada por dicho paisaje botánicamente más complejo. A su vez, proponen que los paisajes ganaderos deben ser complejos en su conformación botánica para que la ganadería pastoril sea un factor de biodiversidad con distribución homogénea a través de la superficie que ocupan y con ello, revertir la degradación ambiental asociada a la ganadería pastoril. Además, los autores realizaron un análisis de especies indicadoras. Entre las especies asociadas con el SSP, se identificó a *Chunga burmeisteri* Hartlaub, la cual, no se registró en los otros dos sistemas. Los autores comentaron que, debido a que esta especie solamente anida en árboles, su presencia se asoció a la estructura característica de los SSP.

Considerando lo expuesto en este apartado, se puede considerar a los SSP como estrategias basadas en el establecimiento de grupos funcionales de organismos orientados a cubrir la producción pecuaria evitando la simplificación de los sistemas ganaderos, lo cual prioriza el mantenimiento de la integridad funcional del ecosistema al ser lo más semejante posible a los ecosistemas naturales y finalmente tiene efectos positivos en la conservación de la biodiversidad (Argote *et al.*, 2022; Ballesteros-Correa y Pérez-Torres, 2022; Pascual *et al.*, 2021).

2.7 Aporte de los SSP al bienestar animal

La sostenibilidad cobra relevancia a nivel social, económico y ambiental en la producción de alimentos. Ante la creciente preocupación de los consumidores por adquirir productos que incorporen prácticas que preserven la salud de los animales. El bienestar animal contribuye a la sostenibilidad económica de los sistemas ganaderos a través de la mejora en el estatus de comercialización de los productos que incorporan estas medidas en su producción (Molina, 2021). Por otro lado, Blanco-Penedo *et al.* (2020) y Szorobura *et al.* (2022) mencionaron que la implementación de prácticas que reduzcan el estrés de los animales y que aporten a su bienestar, permitirá facilitar su adaptación a los cambios ambientales ocasionados por el cambio climático, lo que mejorará la resiliencia y sostenibilidad del sistema.

El ganado bovino en pastoreo desarrolla interacciones sociales entre ellos clasificadas como afiliativas y agonísticas, las primeras se consideran sociopositivas y las segundas perjudiciales a un comportamiento productivo alto. Améndola *et al.* (2016) registraron la frecuencia de relaciones afiliativas y agonísticas en vacas pastoreando en un dosel vegetal

dominado por *C. nlemfuensis* y en otro con SSP de *L. leucocephala* plantada, árboles dispersos y gramíneas tropicales principalmente *M. maximus* y *C. nlemfuensis*, la frecuencia de interacciones afiliativas fue 40% menor entre las vacas pastoreando el dosel de gramínea en comparación a las que estaban en el SSP. Concluyen los autores que el ambiente silvopastoril promueve una interacción social más positiva entre los animales y esto conduce a un mayor grado de bienestar.

Deniz *et al.* (2021) registraron características microclimáticas en áreas sin y con sombra en un potrero con al menos seis especies arbóreas y una combinación de gramíneas tropicales y templadas. Las áreas con sombra mostraron un microclima con menor temperatura ambiental, velocidad del viento y carga de calor radiante pero mayor humedad relativa que las áreas sin sombra. Estas diferencias microclimáticas se asociaron a que las horas y días con mayor carga calórica las vacas buscaran las áreas con sombra. Concluyen los autores que los arreglos silvopastoriles planificados o con presencia de árboles pueden dar condiciones microclimáticas favorables a un mayor confort del animal sobre todo en condiciones de ambientes con alta carga calórica.

Por su parte, Zúñiga *et al.* (2020) compararon indicadores de bienestar animal en vacas pastoreando un SSP de *A. acuminata* y *C. clandestinus* y un SSA de *C. clandestinus*. Observaron que el número de moscas *Haematobia irritans* L. por animal fue mayor en el SSA (56) que en el SSP (44). La temperatura promedio de capa fue mayor en los animales del SSA (37.4°C) que en los del SSP (33.8 °C). Así mismo, el nivel de suciedad (0 animal limpio – 3 animal sucio) y la distancia de fuga fueron menores en el SSP (1.5 y 0.7 m) que en el SSA (2.0 y 1.3 m). Las diferencias se asociaron con la diversificación del SSP dada por la inclusión de arbóreas y la subsecuente generación de espacios de confort mejor distribuidos, que evitan el hacinamiento de los animales en los momentos de reposo y rumia. En otro trabajo, Galloso (2021) demostró que búfalos de agua pastoreando sobre un SSP de *M. maximus* cv. Likoni y *L. leucocephala* cv. Cunningham dedicaron más tiempo al pastoreo bajo los árboles que en un SSA, donde dedicaron más tiempo al baño termorregulador. A su vez, se determinó que es posible prescindir de esos baños y/o revolvederos cuando se manejan búfalos bajo condiciones de sombra en un SSP. Los trabajos mencionados muestran que la generación de un microclima por medio de la sombra en los SSP tiene un efecto positivo en el bienestar animal, lo que puede beneficiar el comportamiento productivo al facilitar el pastoreo en áreas que reducen el estrés térmico de los animales. Considerando lo discutido en este apartado se

puede constatar que los SSP proporcionan áreas de confort para los animales, lo que disminuye su estrés y mejora su convivencia, lo cual impacta positivamente en su bienestar.

2.8 Aporte de los SSP para la producción de forraje disponible

Como se discutirá en este apartado con la referencia de diversos estudios, se ha demostrado el aporte de los SSP en la productividad de los sistemas ganaderos a través de la mejora de la cantidad y calidad de forraje disponible. En este contexto, Oliva *et al.* (2018) registraron, al dar seguimiento a la acumulación de forraje en *Lolium multiflorum* Lam. y *Trifolium repens*, L. que en ambas especies podría obtenerse una acumulación de forraje superior en 8 a 11% cuando son crecidas en áreas sombreadas por cualesquiera de tres especies de árboles presentes en SSP, en comparación a las crecidas en áreas sin cobertura aérea por árboles. A partir de esta experiencia los autores indican que la presencia de árboles podría promover un microclima favorable a que especies herbáceas muestren una mayor acumulación de biomasa aérea. Azuara-Morales *et al.* (2020) agregan que el efecto positivo de la cobertura arbórea sobre la acumulación de herbáceas puede aumentarse con la densidad planificada de individuos leñosos por unidad de superficie, si el aumento en la densidad promueve un microclima favorable hacia la cobertura herbácea. Esta afirmación la derivaron de una experiencia en un SSP con *L. leucocephala* cv. Cunningham a 15,000 y 25,000 plantas/ha y *Digitaria eriantha* Steud cv. Pangola, de la menor a la mayor densidad de *L. leucocephala*, la oferta total de forraje aumentó en 22%, este aumento no se explicó por el incremento en la cantidad de árboles, se asoció a los efectos positivos que la arbórea leguminosa tuvo sobre el suelo y el microclima, que mejoró las condiciones para el desempeño productivo de la gramínea.

Vásquez *et al.* (2020) demostraron que la especie de árbol y su topología pueden influir en el comportamiento del estrato herbáceo asociado en un SSP. En el SSP de *A. acuminata* en franjas, se mostró el mayor rendimiento y calidad del estrato herbáceo con hasta 16.1, 66.1 y 48.2% de proteína cruda (PC), digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) y fibra detergente neutro (FDN), respectivamente, en comparación a otros tres SSP: *P. patula* en franjas, *C. macrocarpa* en cerco vivo, y árboles dispersos de *C. quindiuense*. Apuntan los autores a que la mejoría se debió a condiciones microclimáticas más favorables al desempeño de la cobertura herbácea. Azuara-Morales *et al.* (2020), Oliva *et al.* (2018) y Vásquez *et al.* (2020) coinciden en registrar una mayor cantidad de forraje en oferta de las herbáceas cuando

formaron parte de SSP en comparación a crecer en praderas monófitas. Explican estos resultados a los beneficios aportados por las arbóreas incorporadas en dichos arreglos, entre estos beneficios contabilizan: mejora en las propiedades físicas y químicas del suelo por la fijación de nutrientes, incremento en MO y mejora a la estructura del suelo, así como generación de un microclima más favorable para el crecimiento de las herbáceas.

Papachristou *et al.* (2020) concluyeron que en el estudio del impacto de SSP, se debe tomar en cuenta el grado de sombreado por parte del componente arbóreo ya que es un factor que influye en el comportamiento forrajero del estrato herbáceo. En un arreglo *Robinia pseudoacacia* L.- *Quercetalia pubescentis* Br.-Bl., a 90, 60 y 30% de cobertura de copa, el estrato herbáceo mostró poca variación en la cantidad de biomasa aérea, pero en la calidad forrajera medida como contenido de proteína cruda si encontraron diferencias, el sombreado medio 60% se mantuvo como la mejor opción. Gamarra *et al.* (2018) encontraron en un SSP *Prosopis alba* Griseb. y *Prosopis nigra* Griseb. – *M. maximus* cv. Gatton Panic, *D. eriantha* y *Cenchrus ciliaris* L., que la biomasa acumulada por las gramíneas fue: 1.65 y 0.46 t/ha, bajo y fuera del sombreado por los árboles, respectivamente. Explicaron esta mejoría en la cantidad de biomasa como consecuencia del sombreado, ya que algunas de las características físicas y químicas del suelo bajo la sombra y fuera de ella no mostraron diferencia.

Como evidencia de las variaciones en la radiación fotosintéticamente activa cuando se comparan sistemas con diversas densidades de arbóreas y áreas abiertas, Paciullo *et al.* (2021) estimaron en un SSP de *Urochloa decumbens* (Stapf) R. D. Webster, *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *L. leucocephala*, *Acacia mangium* Willd., *Acaciella angustissima* (Mill.) Britton & Rose y *Mimosa artemisiana* Heringer & Paula, con 342 árboles/ha, una reducción del 46% en la radiación fotosintéticamente activa al compararlo con un SSA de *U. decumbens*. Lo cual, tuvo un efecto en el rendimiento, morfología y calidad de la herbácea. En el SSA se obtuvo una mayor producción de forraje y la herbácea produjo una mayor cantidad de macollos, sin embargo, en el SSP se observaron mayores porcentajes de hojas y menores porcentajes de materia muerta. El contenido de PC en la herbácea fue mayor en el SSP (14.1%) que en el SSA (11.7%). Los autores mencionaron que el SSP presentó una alta resiliencia incluso bajo las condiciones de sombra intensa. A su vez, Pereira *et al.* (2021) evaluaron dos SSP con dos densidades de *Eucalyptus urograndis* (227 y 357 árboles/ha) asociados a *U. brizantha* cv. BRS Piatã y un SSA de la herbácea. Observaron que en ambos tratamientos con SSP el valor nutritivo del follaje se mejoró en comparación con el SSA.

Presentaron una mayor cantidad de PC (12.4 y 13.7 vs 9.5%) y DIVMS (66.8 y 71.2 vs 61.6%), y, concentraciones menores de FDN (68.2 y 66.0 vs 69.2%) y FDA (31.2 y 30.1 vs 31.9%). Al respecto, los autores mencionaron que en sistemas con mayores densidades de arbóreas tiende a incrementarse el área foliar de las gramíneas por la competencia por luz que se genera entre ellas. Eso se debe a la disminución de la densidad de flujo fotónico de la energía radiante que se produce en zonas con mayor cantidad de sombra, lo que puede influir en el contenido proteico (Hernández y Guenni, 2008).

Ramírez (2018) documentó que el sombreado de las arbóreas en un SSP no siempre puede mejorar el rendimiento de las herbáceas asociadas. El autor trabajó con densidades baja (50 a 200 árboles/ha), media (201 a 350 árboles/ha) y alta (más de 350 árboles/ha). La tendencia observada fue que, a mayor densidad de arbóreas, hubo una menor intensidad de luz bajo el dosel y menor producción de biomasa forrajera. Los valores obtenidos para esos parámetros fueron de 8594, 6436 y 3801 MJ/m²/año y 2859, 1988 y 1679 kg MS/ha para las densidades baja, media y alta respectivamente. Por lo anterior, se asociaron los rendimientos obtenidos con la intensidad de luz que llegó bajo el dosel en cada tratamiento. Por otro lado, Araújo *et al.* (2020) evaluaron a *U. brizantha* en monocultivo y asociada a tres densidades de palmas (80, 131 y 160 palmas/ha). Observaron cambios morfológicos en la herbácea derivados de la variación en la densidad de palmas. Las tasas de aparición de los macollos basales en las densidades de 131 y 160 palmas/ha fueron similares y más lentas comparadas con el monocultivo y la densidad de 80 palmas/ha. Sin embargo, estos tratamientos también presentaron mayores tasas de mortalidad de macollos, mientras que las densidades más altas (160 y 131 palmas/ha) presentaron altas tasas de supervivencia de macollos. Estos resultados son similares a los obtenidos por Paciullo *et al.* (2021), quienes observaron una mayor producción de macollos por parte de las herbáceas en la zona con menor cantidad de sombra. Al respecto, Langer (1958) comentó que la penetración de la luz en la base del dosel es uno de los principales factores que interfieren con el macollamiento.

Considerando lo discutido en este apartado, existen efectos variables del incremento en la densidad e inclusión de arbóreas sobre el rendimiento y valor nutritivo de las herbáceas en los SSP. Dados esos efectos, es necesario establecer un punto de equilibrio para el diseño de sistemas ganaderos diversos que contemplen la inclusión de especies arbóreas y herbáceas, en los que se conjuguen objetivos de calidad y cantidad de biomasa forrajera que favorezcan

la productividad de todo el sistema. Esto permitirá que se logre un efecto positivo en términos de sostenibilidad.

2.9 Conclusiones

Considerando lo discutido en la presente revisión, se pueden considerar a los SSP como sistemas ganaderos que promueven la sostenibilidad. Esto se logra a través de la mejora de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo, la conservación de la biodiversidad, la promoción del bienestar animal, la contribución a la mitigación de las emisiones de GEI y la mejora en la productividad del forraje. Para el diseño de un SSP se considera importante realizar una revisión de literatura exhaustiva sobre los atributos de cada una de las especies que se deseen emplear, así como de las características del ecosistema en donde se desee establecer, pues como se discutió en este documento, los efectos suelen ser muy variados. Por tanto, se requiere tener presente la mayor cantidad de información posible para tomar decisiones sobre el diseño y manejo de los SSP.

2.10 Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma Chapingo por facilitar los espacios y los medios digitales para la realización de esta revisión.

2.11 Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

2.12 Referencias bibliográficas

Acevedo, I., Sánchez, A. & Mendoza, B. Evaluación del nivel de degradación del suelo en dos sistemas productivos en la depresión de Quíbor. II. Calidad del suelo. *Bioagro*, 33(2): 127-134. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7904321>, 2021.

Aguilar-Jiménez, J. R., Aguilar-Jiménez, C. E., Guevara-Hernández, F., Galdámez-Galdámez, J., Martínez-Aguilar, F., La O-Arias, M. A., et al. Clasificación y caracterización de los sistemas familiares de producción bovina de la región frailesca de Chiapas, México, con base en el aporte de la ganadería al ingreso familiar. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(1): 1-24, 2023. DOI: <http://doi.org/10.56369/tsaes.4131>

- Améndola, L., Solorio, F. J., Ku-Vera, J. C., Améndola-Massiotti, R. D., Zarza, H. & Galindo, F. Social behaviour of cattle in tropical silvopastoral and monoculture systems. *Animal*, 10(5): 863-867, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731115002475>
- Araújo, R. A., Rodrigues, R. C., Costa, C. S., Santos, F. N. S., Lima, A. J. T., & Rodrigues, M. M. Dynamics and stability of Marandu grass tillers in monocrop systems and babassu palm silvopastoral systems. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 42: e42445, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.42445>
- Argote, K., Rodríguez-Sánchez, B., Quintero, M. & Francesconi, W. One Tree at a Time: Restoring landscape connectivity through silvopastoral systems in transformed amazon landscapes. *Diversity*, 14(10): 846, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/d14100846>
- Azuara-Morales, I., López-Ortiz, S., Jarillo-Rodríguez, J., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E., & Castillo-Gallegos, E. Forage availability in a silvopastoral system having different densities of *Leucaena leucocephala* under Voisin grazing management. *Agroforestry Systems*, 94: 1701-1711, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00487-5>
- Ballesteros-Correa, J. & Pérez-Torres, J. Silvopastoral and conventional management of extensive livestock and the diversity of bats in fragments of tropical dry forest in Córdoba, Colombia. *Agroforestry Systems*, 96: 589–601, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00698-4>
- Berhanu, Y., Olav, L., Nurfeta, A., Angassa, A., & Aune, J. B. Methane emissions from ruminant livestock in Ethiopia: promising forage species to reduce CH₄ emissions. *Agriculture*, 9(6): 130, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture9060130>
- Blanco-Penedo, I., Cantalapiedra, J., & Llonch, P. Impacto del cambio climático sobre el bienestar animal en los sistemas ganaderos. *ITEA-Información Técnica Económica Agraria*, 116(5): 424-443. [https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2020/116-5/\(424-443\)%20ITEA%20116-5%20EXTRA.pdf](https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2020/116-5/(424-443)%20ITEA%20116-5%20EXTRA.pdf), 2020.
- Bueno, L. L. & Camargo, G. J. C. Nitrógeno edáfico y nodulación de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles. *Acta Agronómica*, 64(4): 349-354, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.45362>

- Bugarín, J., Bojórquez, J. I., Lemus, C., Murray, R. M., Hernández, A., Ontiveros, H., *et al.* Comportamiento de algunas propiedades fisicoquímicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la llanura norte de Nayarit. *Cultivos Tropicales*, 31(2): 48-55. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/547>, 2010.
- Cabrera, D. G. de la C., Sánchez, R. J. A., & de León, L. D. P. Macrofauna edáfica: composición, variación y utilización como bioindicador según el impacto del uso y calidad del suelo. *Acta Botánica Cubana*, 221: 1-21. <http://www.revistasgeotech.com/index.php/abc/article/view/404>, 2021.
- Caicedo, R. D. M., Benavides, R. H. R., Carvajal, P. L. A. & Ortega, H. J. P. Población de macrofauna en sistemas silvopastoriles dedicados a la producción lechera: análisis preliminar. *LA GRANJA: Revista de Ciencias de la Vida*, 27(1): 77-85, 2018. DOI: <http://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.06>
- Camero-Rey, A. & Rodríguez-Díaz, H. Características químicas del suelo, producción forrajera y densidad poblacional de lombrices en un sistema silvopastoril en la zona Huetar Norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 28(1): 91-104. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n1/0379-3982-tem-28-01-00091.pdf>, 2015.
- Castillo-Valdez, X., Etchevers, J. D., Hidalgo-Moreno, C. M. I. & Aguirre-Gómez, A. Evaluación de la calidad de suelo: generación e interpretación de indicadores. *Terra Latinoamericana*, 39: 1-12. e698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.698>
- Contreras-Santos, J. L., Falla-Guzmán, C. K., Rodríguez, J. L., Fernando-Garrido, J., Martínez-Atencia, J., & Aguayo-Ulloa, L. Reserva de carbono en sistemas silvopastoriles: Un estudio en el Medio Sinú, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1): 49-138. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v34n1/1659-1321-am-34-01-00008.pdf>, 2023.
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J. & Fallas-Guzmán, C. K. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1): 29-41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>
- Crespo, G. & Fraga, S. Nota técnica acerca del aporte de hojarasca y nutrientes al suelo por las especies *Cajanus cajan* (L.) Millsp y *Albizia lebbbeck* (L.) Benth en sistemas silvopastoriles.

Revista Cubana de Ciencia Agrícola, 36(4): 397-402.
<https://www.redalyc.org/pdf/1930/193018080014.pdf>, 2002.

Cruz-Macías, W. O., Rodríguez-Larramendi, L. A., Salas-Marina, M. Á., Hernández-García, V., Campos-Saldaña, R. A., Chávez-Hernández, M. H., et al. Efecto de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico en la acidez de suelos cultivados con maíz en dos regiones de Chiapas, México. *Terra Latinoamericana*, 38(3): 475-480, 2020. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.506>

De Bernardi, M., Priano, M. E., Fusé, V. S., Fernández, M. E., Gyenge, J., Guzmán, S. A., et al. High Methane Uptake from Soils of Low and High Density Radiata Pine Afforestations Compared to Herbaceous Systems. *Journal of Sustainable Forestry*, 40(1): 99-109, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1745653>

Deniz, M., Schmitt, F. A. L., Hötzel, M. J., de Sousa, K. T., Pinheiro, M. F. L. C., & Sinisgalli, P. A. Microclimate and pasture area preferences by dairy cows under high biodiversity silvopastoral system in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 64: 1877–1887, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01975-0>

Deniz, M., de Sousa, K. T., Moro, M. F., do Vale, M. M., Dittrich, J. R., Filho, L. C. P. M., et al. Social hierarchy influences dairy cows' use of shade in a silvopastoral system under intensive rotational grazing. *Applied Animal Behaviour Science*, 244: 105467, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2021.105467>

Díaz, L. M. I., Gamarra, L. C. C., Ruiz, D. S. & Vera, de O. M. Contenido de materia orgánica en suelos de sistemas silvopastoriles establecidos en el Chaco Central paraguayo. *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay*, 25(2): 131-143, 2020. DOI: <https://doi.org/10.32480/rscp.2020.25.2.131>

El Bilali, H., Callenius, C., Strassner, C. & Probst, L. Food and nutrition security and sustainability transitions in food systems. *Food Energy Security*, 8(2): e00154, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/fes3.154>

Escobar, M. A., Bartolomé, F. J. & González, V. N. Estudio comparativo macrofauna del suelo en sistema agroforestal, potrero tradicional y bosque latifoliado en microcuenca del trópico seco, Tomabú, Nicaragua. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 6(22): 39-49, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5377/farem.v0i22.4520>

Escobar, M. I., Navas, P. A., Medina, C. A., Corrales, A. J. D., Tenjo, A. I. & Borrás, S. L. M. Efecto de prácticas agroecológicas sobre características del suelo en un sistema de lechería especializada del trópico alto colombiano. *Livestock Research for Rural Development*, 32(4). <https://www.researchgate.net/publication/340998749>, 2020.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. <https://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>, 2015.

Galloso, H. M. A. *Potencial de los sistemas silvopastoriles para la producción bufalina en ambientes tropicales*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Veterinaria, Sección Biociencias y Ciencias Agroalimentarias. Córdoba, España: Universidad de Córdoba. <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/22085/2021000002348.pdf?sequence=1&isAllo wed=y>, 2021.

Gamarra, L. C. C., Díaz, L. M. I., Vera, de O. M., Galeano, M. D. P. & Cabrera, C. A. J. N. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(46): 4-26. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v9n46/2007-1132-remcf-9-46-4.pdf>, 2018.

García, Y., Ramírez, W. & Sánchez, S. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2): 125-138. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v35n2/pyf01212.pdf>, 2012.

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., et al. *Enfrentando el cambio climático a través de la ganadería – Una evaluación global de las emisiones y oportunidades de mitigación*. Roma, Italia: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). <https://www.fao.org/3/i3437s/i3437s.pdf>, 2013.

Gómez, V. J., Cobos, M. F. & Hasang, M. E. Sostenibilidad de los sistemas de producción de ganadería extensiva. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 4(CIEIS2019): 180-195. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7368619>, 2019.

González-Valdivia, N. A., Martínez-Puc, J. F. & Echavarría-Góngora, E. J. Malacofauna en dos sistemas silvopastoriles en Estelí, Nicaragua. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 5(1): 3-13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.36610/j.jsaas.2018.050100003>

- Gutiérrez-Bermúdez, C. del C., Mendieta-Araica, B. G. & Noguera-Talavera, Á. J. Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el Corredor Seco de Nicaragua. *Pastos y Forrajes*, 43(1): 32-40. https://www.researchgate.net/publication/348407079_Composicion_trofica_de_la_macrofauna_edafica_en_sistemas_ganaderos_en_el_Corredor_Seco_de_Nicaragua, 2020.
- Haddix, M. L., Gregorich, E. G., Helgason, B. L., Janzen, H., Ellert, B. H., & Cotrufo, M. F. Climate, carbon content, and soil texture control the independent formation and persistence of particulate and mineral-associated organic matter in soil. *Geoderma*, 363: 114160, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114160>
- Hanisch, A. L., Negrelle, R. R., Bonatto, R. A., Nimmo, E. R. & Lacerda, A. E. B. Evaluating sustainability in traditional silvopastoral systems (caívas): looking beyond the impact of animals on biodiversity. *Sustainability*, 11(11): 3098, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11113098>
- Hernández, C. M., Sánchez, C. S. & Simón, G. L. Efecto de los sistemas silvopastoriles en la fertilidad edáfica. *Zootecnia Tropical*, 26(3): 319-321. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000300035, 2008.
- Hernández, M., & Guenni, O. Producción de biomasa y calidad nutricional del estrato graminoide en un sistema silvopastoril dominado por samán (*Samanea saman* (Jacq) Merr). *Zootecnia Tropical*, 26(4): 439-453. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692008000400004, 2008.
- Hoffland, E., Kuyper, T. W., Comans, R. N. J., & Creamer, R. E. Eco-functionality of organic matter in soils. *Plant Soil*, 455: 1–22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04651-9>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>
- Irawan, A., Tri, N. C., Kustantinah, Prasetyo, W. B., Astuti, A. & Ates, S. Effect of *Leucaena leucocephala* and corn oil on ruminal fermentation, methane production and fatty acid profile:

an *in vitro* study. *Animal Production Science*, 61(5): 459-469, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN20003>

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. & Schuman, G. E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1): 4-10, 1997. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>

Landholm, D. M., Pradhan, P., Wegmann, P., Romero, S. M. A., Suárez, S. J. C. & Kropp, J. P. Reducing deforestation and improving livestock productivity: greenhouse gas mitigation potential of silvopastoral systems in Caquetá. *Environmental Research Letters*, 14: 114007, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3db6>

Langer, R. H. M. Changes in the tiller population of grass swards. *Nature*, 182(4652): 1817-1818, 1958. DOI: <https://doi.org/10.1038/1821817a0>

Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I. & Rilling, M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1: 544–553, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>

Lok, S., Fraga, S., Noda, A. & García, M. Almacenamiento de carbono en el suelo de tres sistemas ganaderos tropicales en explotación con ganado vacuno. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(1): 75-82. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193028545014.pdf>, 2013.

Lopera, J. J., Márquez, S. M., Ochoa, D. E., Calle, Z., Sossa, C. P. & Murgueitio, E. Producción agroecológica de leche en el trópico de altura: sinergia entre restauración ecológica y sistemas silvopastoriles. *Agroecología*, 10(1): 79-85. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300761>, 2017.

Marinero, S. & Grau, R. H. Comparison of animal biodiversity in three livestock systems of open environments of the semi-arid Chaco of Argentina. *The Rangeland Journal*, 37(5): 497-505, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1071/RJ15052>

Molina, N. D. P. Hacia una nueva normalidad: la Responsabilidad Social Corporativa y el bienestar animal como una oportunidad para las empresas. En: Miranda, N. L., & Santinelli, R. M. A. (Coord.). *Responsabilidad social y Sostenibilidad: disrupción e innovación ante el cambio de época*. Estado de México, México: Universidad Anáhuac México, p. 474-492.

<http://pegaso.anahuac.mx/accesoabierto/publicaciones.php?Accion=Informacion&Pub=153>, 2021.

Núñez-Ravelo, F., Ugas-Pérez, M., Calderón-Castellanos, R. & Rivas-Meriño, F. Cuantificación del carbono orgánico y materia orgánica en suelos no rizosféricos o cubiertos por *Avicennia germinans* (L.) y *Conocarpus erectus* (L.) emplazados en Boca de Uchire, laguna de Unare, Estado de Anzoátegui, Venezuela. *Revista Geográfica de América Central*, 66(1): 340-366, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.15359/rgac.66-1.13>

Oliva, C. M., Collazos, S. R., Goñas, M. M., Bacalla, E., Vigo, M. C., Vázquez, P. H., et al. Efecto de los sistemas de producción sobre las características físico-químicas de los suelos del distrito de Molinopampa, provincia de Chachapoyas, región Amazonas. *INDES Revista de Investigación para el Desarrollo Sustentable*, 2(1): 44-52. <http://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDES/article/view/63/178>, 2016.

Oliva, M., Culqui, M. L., Leiva, S., Collazos, R., Salas, R., Vásquez, H. V., et al. Reserva de carbono en un sistema silvopastoril compuesto de *Pinus patula* y herbáceas nativas. *Scientia Agropecuaria*, 8(2): 149-157, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.07>

Oliva, M., Valqui, L., Meléndez, J., Milla, M., Leiva, S., Collazos, R., et al. Influencia de especies arbóreas nativas en sistemas silvopastoriles sobre el rendimiento y valor nutricional de *Lolium multiflorum* y *Trifolium repens*. *Scientia Agropecuaria*, 9(4): 579-583, 2018. DOI: <https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.14>

Ordoñez-Solarte, G., Erazo-Gómez, R. E. & Navia-Estrada, J. F. Evaluación de la biodiversidad en aves diurnas bajo diferentes Sistemas de producción en el municipio de La Unión, departamento de Nariño, Colombia. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias – FAGROPEC*, 7(1): 3-10. <https://editorial.uniamazonia.edu.co/index.php/fagropec/article/view/318>, 2015.

Oropesa-Casanova, K., Pentón-Fernández, G., Lezcano-Fleires, J. C., Miranda-Tortoló, T. & Núñez-García, N. F. Biodiversidad y manejo de los residuos agropecuarios en una finca del municipio de Perico, Matanzas. *Pastos y Forrajes*, 43(2): 112-119. <https://payfo.ihatuey.cu/index.php?journal=pasto&page=article&op=view&path%5B%5D=2159>, 2020.

- Oyelami, B. A. & Osikabor, B. (2022). Adoption of Silvopastoral Agroforestry System for a Sustainable Cattle Production in Nigeria. *Journal of Applied Sciences Environmental Management*, 26(8): 1397-1402, 2022. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/jasem.v26i8.12>
- Paciullo, D. S. C., Fernandes, P. B., Carvalho, C. A. B., Morenz, M. J. F., Lima, M. A., Maurício, R. M., *et al.* Pasture and animal production in silvopastoral and open pasture systems managed with crossbred dairy heifers. *Livestock Science*, 245: 104426, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104426>
- Papachristou, T. G., Platis, P. D., Papachristou, I., Samara, T., Spanos, I., Chavales, E., *et al.* How the structure and form of vegetation in a black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) silvopastoral system influences tree growth, forage mass and its nutrient content. *Agroforestry Systems*, 94: 2317-2330, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00552-z>
- Pascual, U., Adams, W. M., Díaz, S., Sharachchandra, L., Mace, G. M. & Turnhout, E. Biodiversity and the challenge of pluralism. *Nature Sustainability*, 4: 567–572, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00694-7>
- Peña-Domene, M., Ayestarán-Hernández, L. M., Márquez-Torres, J. F., Martínez-Monroy, F., Rivas-Alonso, E., Carrasco-Carballido, P. V., *et al.* Sistemas silvopastoriles enriquecidos: una propuesta para integrar la conservación en la producción ganadera en comunidades rurales de Los Tuxtlas, México. *Acta Botanica Mexicana*, 129: e1925, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1925>
- Pereira, M., Morais, M. G., Fernandes, P. B., dos Santos, V. A. C., Glatzle, S. & de Almeida R. G. Beef cattle production on Piatã grass pastures in silvopastoral systems. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 9(1): 1-12, 2021. DOI: [https://doi.org/10.17138/tgft\(9\)1-12](https://doi.org/10.17138/tgft(9)1-12)
- Pérez, A. M., Medina, A. M. F., Hurtado G. A., Arboleda Z. E. M. & Medina S. M. Reservas de carbono del pasto *Cenchrus clandestinus* (Poaceae) en los sistemas de manejo tradicional y silvopastoril, en diferentes relieves. *Revista de Biología Tropical*, 67(4): 769-783, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v67i4.34529>
- Pérez-Sánchez, E., Hernández, H. E., Jiménez-Trujillo, J. A., Betanzos-Simón, J.E., Casasola-Coto, F., Martínez-Salinas, A., *et al.* Reconversión de ganadería convencional a silvopastoril: Estudio de caso rancho El Once en Campeche, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 25(3): 174-175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.53897/RevAIA.21.25.46>

Ramírez, C. R. *Crecimiento de forraje herbáceo del sistema silvopastoril tradicional de la Sierra de Huautla, Morelos*. Tesis presentada en opción al grado científico de Maestro en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/77d83e2e-0dad-48d7-b097-45b19433b9e2>, 2018.

Rodríguez-Moreno, O. G., Nahed-Toral, J., Guevara-Hernández, F., Alayón-Gamboa, J. A. & Grande-Cano, J. D. Historia y caracterización técnica y socioeconómica de la ganadería bovina en la costa de Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(55): 1-13. <https://www.researchgate.net/publication/342376836>, 2020.

Romero, D. G., Trillo, Z. F., Orellana, C. J., Quiroga, E. P., Gamarra, B. J., Rojas, E. D., et al. Efecto de *Acacia macracantha* en las propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema silvopastoril. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(3): e20389, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i3.20389>

Saleem, M., Hu, J. & Jousset, A. More Than the Sum of Its Parts: Microbiome Biodiversity as a Driver of Plant Growth and Soil Health. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 50: 145-168, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062605>

Sanderman, J., Creamer, C., Baisden, W. T., Farrell, M. & Fallon, S. Greater soil carbon stocks and faster turnover rates with increasing agricultural productivity. *Soil*, 3(1): 1–16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-3-1-2017>

Sandoval-Pelcastre, A. A., Ramírez-Mella, M., Rodríguez-Ávila, N. L. & Candelaria-Martínez, B. Árboles y arbustos tropicales con potencial para disminuir la producción de metano en rumiantes. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(2): 33. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/3061>, 2020.

Sarandón, S. J. & Flores, C. C. *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sustentables*. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata. <https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/72/54/181-1>, 2014.

Silva-Olaya, A. M., Olaya-Montes, A., Polanía-Hincapié, K. L., Cherubin, M. R., Duran-Bautista, E. H. & Ortiz-Moreno, F. A. Silvopastoral systems enhance soil health in the Amazon region. *Sustainability*, 14: 320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14010320>

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. & de Haan, C. *La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones*. Roma, Italia: Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). <https://www.fao.org/3/a0701s/a0701s.pdf>, 2009.

Szorobura, F. A., Lynch, G. M., Simonetti, L., Ghibaudi, M., Mc Cormick, M. & Arioni, J. M. Bienestar Animal: estrés al destete en ovinos. *Revista Científica y Técnica Agropecuaria, Agroindustrial y Ambiental*, 9(1): 14-26. <http://servicios.ingenieria.unlz.edu.ar:8080/ojs/index.php/agrarias/article/view/90>, 2022.

Toledo, M. *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: conceptos y métodos*. Tegucigalpa, Honduras: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <http://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/3108/BVE17069071e.pdf;jsessionid=ED8D8B29A94C71D41C0B761F01B60C2F?sequence=1>, 2016.

Vargas, B. B., Escobar, P. Y., Rodríguez, F. R., Ramos, G. Y. M., Rodríguez, S. E. J. & Fuente, M. O. Propiedades químicas del suelo en cuatro fincas de la agricultura suburbana en Santiago de Cuba. *Agrisost*, 26(3): 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7433751>

Vásquez, H. V., Valqui, L., Alegre, J. C., Gómez, C. & Maicelo, J. L. Análisis de cuatro sistemas silvopastoriles en Perú: Caracterización física y nutricional de pasturas, composición florística, reserva de carbono y CO₂. *Scientia Agropecuaria*, 11(2): 167-176, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.03>

Viruel, E., Fontana, C. A., Bassi, D., Puglisi, E., Radrizzani, A. B., Martinez, C. L., et al. Silvopastoral systems in dry Chaco, Argentina: Impact on soil chemical parameters and bacterial communities. *Soil use and management*, 37(4): 866-878, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12653>

Wanapat, M., Cherdthong, A., Phesatcha, K. & Kang, S. Dietary sources and their effects on animal production and environmental sustainability. *Animal Nutrition*, 1(3): 96-103, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aninu.2015.07.004>

Walker, B. H. Biodiversity and Ecological Redundancy. *Conservation Biology*, 6(1): 18-23, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1992.610018.x>

Yalta, J., Ríos, N., Valqui, L., Bobadilla, L. G., Vigo, C. N. & Vásquez, H. V. Huella hídrica de la producción lechera en la cuenca ganadera Pomacochas, Perú. *Livestock Research for Rural Development*, 33(10): #125. <http://www.lrrd.org/lrrd33/10/33125hvasq.html>, 2021.

Zúñiga, L. A., Rodríguez, S. A. C., Benavides, C. J. C., Medrano, G. C. & García, C. F. E. Indicadores de bienestar animal en vacas lecheras en un sistema silvopastoril del trópico alto colombiano. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(4): e16871. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1609-91172020000400017&script=sci_arttext, 2020.

3. POTENCIAL FORRAJERO DE ARBÓREAS NATIVAS DE LA SELVA BAJA CADUCIFOLIA EN EL ALTO BALSAS

Forage potential of native trees of deciduous forest in the Alto Balsas

Laura Karen Trejo-Arista¹, Enrique Cortés-Díaz^{1*}, Pedro Arturo Martínez-Hernández¹,
Maximino Huerta-Bravo¹, Giovany Tonatíuh González-Bonilla², Claudio Vite-Cristóbal³

¹*Posgrado en Producción Animal, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-
Texcoco km 38.5, Chapingo, 56230, Texcoco, México.* ²*Wild Forest Consulting, Galeana s/n,
Huitchila, 62923, Tepalcingo, Morelos.* ³*Maestría en Producción Pecuaria Tropical,
Tecnológico Nacional de México campus Tantoyuca. Desv. Lindero-Tametate S/N, Col. La
Morita, 92100, Tantoyuca, Veracruz.*

*Correspondencia: ecodia@yahoo.com.mx

3.1 Resumen

La ganadería del Alto Balsas es importante socioeconómica y culturalmente por la población involucrada y ocupar las partes accidentadas de su fisiografía. En esta región hay arbóreas nativas adaptadas al medio físico que los pobladores han identificado como fuente de alimento para el ganado y queda por determinar su potencial forrajero en términos nutricionales. El objetivo fue determinar las concentraciones de proteína cruda (PC), cenizas (Ce), fibras detergentes neutro (FDN) y ácido (FDA) y minerales en el follaje de arbóreas nativas del Alto Balsas identificadas por los pobladores como consumidas por los bovinos. Además del análisis por especie, se clasificó la información en tres sitios de muestreo, el análisis estadístico fue mediante conglomerados en función de la similitud de las variables del valor nutritivo. La concentración de PC alcanzó el nivel óptimo (NO) para bovinos en la mayoría de las arbóreas nativas y osciló entre 12.7 y 24.6%. FDA y FDN fueron superiores a lo recomendado. Las concentraciones de Ca, P, Mg y Fe en general fueron mayores al NO. El K se encontró deficiente en dos arbóreas. Generalmente hubo deficiencias de Na, Cu y Zn. Manganeso fue deficiente en cinco arbóreas. Se concluyó que las arbóreas nativas son aptas para proveer follaje con adecuado nivel de PC, FDA y FDN. Solamente en las concentraciones minerales puede haber necesidad de suplementación al ganado que se encuentre consumiendo únicamente las arbóreas evaluadas. Igualmente, debe considerarse la complementariedad entre especies para subsanar los desafíos que suponen las interacciones entre minerales.

Palabras clave: especies consumidas, proteína cruda, contenido mineral, suplementación.

3.2 Abstract

Livestock in the Alto Balsas is socioeconomically and culturally important due to population involved and occupying the rugged parts of its physiography. In this region there are native trees adapted to physical environment that inhabitants have identified as a source of food for cattle and their forage potential in nutritional terms remains to be determined. The objective was to determine the concentrations of crude protein (PC), ash (Ce), neutral detergent fibers

(FDN) and acid (FDA) and minerals in the foliage of native trees of Alto Balsas identified by the inhabitants as consumed by bovines. In addition to analysis by species, the information was classified in three sampling sites, the statistical analysis was through conglomerates based on the similarity of nutritional value variables. PC concentration reached the optimal level (NO) for bovines in most of native trees and ranged between 12.7 and 24.6%. FDA and FDN were higher than recommended. Concentrations of Ca, P, Mg and Fe were generally higher than NO. K was deficient in two trees. Generally, there were deficiencies of Na, Cu and Zn. Manganese was deficient in five trees. It was concluded that native trees can be considered suitable to provide foliage with adequate levels of PC, FDA and FDN. Only in the mineral concentrations may there be a need for supplementation to cattle that are consuming only the evaluated trees. Likewise, the complementarity between species must be considered to overcome the challenges posed by interactions between minerals.

Keywords: consumed species, crude protein, mineral content, supplementation.

3.3 Introducción

La selva baja caducifolia del Alto Balsas sostiene una ganadería extensiva que se ha vuelto poco productiva debido a la degradación de la cubierta vegetal, ocasionada por el sobrepastoreo y deficiente planeación. No obstante, el agostadero nativo posee una gran diversidad de especies vegetales nativas entre las que se encuentran las arbóreas, las cuales en forma empírica han sido referidas como forrajeras por los habitantes de la región. Lo anterior porque han observado que el ganado bovino, que manejan primordialmente, las consume regularmente. El pastoreo extensivo en agostaderos nativos sin control ocasiona que las especies consumidas por el ganado disminuyan su población, dando lugar al incremento de áreas degradadas con poca o nula cubierta vegetal y la simplificación de la cubierta forestal, en términos de su biodiversidad (Aguilar-Jiménez *et al.*, 2023; Castro, 2017; Gómez *et al.*, 2019; Rodríguez-Moreno *et al.*, 2020). Esta degradación es uno de los múltiples factores que pueden afectar la calidad y cantidad de forraje disponible para el ganado y fauna silvestre (Pérez-Sánchez *et al.*, 2021).

Se ha documentado que el enriquecimiento de los sistemas ganaderos con el establecimiento de arbóreas nativas representa una alternativa adecuada para subsanar la degradación de la cubierta vegetal al incrementar la abundancia y diversidad de especies vegetales, además de generar beneficios para el ecosistema y la productividad. Ballesteros-Correa y Pérez-Torres (2022), Contreras-Santos *et al.* (2019), Escobar *et al.* (2020), Gutiérrez-Bermúdez *et al.* (2020) y Viruel *et al.* (2021) observaron en sistemas ganaderos enriquecidos con el establecimiento de arbóreas nativas un efecto benéfico en el aporte nutricional de micro y macronutrientes al suelo, mejora en el contenido de carbono orgánico, materia orgánica y biomasa de raíces,

disminución de la densidad aparente del suelo y la resistencia mecánica a la penetración de raíces, un impacto positivo en las poblaciones de micro y meso fauna del suelo, así como en la biodiversidad, al incrementar la abundancia y diversidad de especies vegetales lo que se tradujo en áreas de refugio para animales silvestres. Similarmente, Contreras-Santos *et al.* (2023), De Bernardi *et al.* (2020) y Landholm *et al.* (2019) estimaron en sistemas enriquecidos con arbóreas nativas un mayor secuestro de gases de efecto invernadero como CO₂ y CH₄ que en sistemas ganaderos tradicionales. Así mismo, Vásquez *et al.* (2020), Papachristou *et al.* (2020) y Paciullo *et al.* (2021), obtuvieron una mayor productividad y mejor valor nutritivo en el forraje disponible de sistemas que contemplaron la inclusión de arbóreas nativas en comparación con sistemas que no las incluyeron.

La reforestación con especies arbóreas nativas con potencial forrajero en términos de valor nutritivo y consumo por el ganado, puede ser una estrategia que mejore el agostadero nativo como recurso alimenticio para el ganado bovino. En las comunidades con ecosistema de selva baja caducifolia en la parte alta de la cuenca hidrológica del Balsas una de las principales actividades de subsistencia de los pobladores, es la cría y engorda de ganado bovino en el agostadero nativo. Ellos han referido que, en éste, se pueden encontrar especies que son buscadas por el ganado para su consumo. Para enmarcar una propuesta de mejora del agostadero, en este estudio se realizó un diagnóstico del valor nutritivo de las especies consumidas. Entre éstas, *Lysiloma divaricatum* (Jacq.) J. F. Macbr., *Guazuma ulmifolia* Lam., *Acacia cochliacantha* Humb. & Bonpl. y *Leucaena collinsii* Britton & Rose, fueron consideradas por su valor nutritivo como especies con potencial forrajero en la zona de estudio por Trejo-Arista (2016). En este sentido, Peña-Domene *et al.* (2022) mencionaron que no basta con establecer especies nativas bien adaptadas para mejorar la rentabilidad y sostenibilidad de la producción ganadera, es necesario considerar su aporte en términos nutricionales para un óptimo diseño de los agroecosistemas.

El objetivo fue determinar las concentraciones de PC, Ce, FDN, FDA y minerales (Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn) en el follaje de arbóreas nativas del Alto Balsas identificadas por los pobladores como consumidas por los bovinos.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Área de estudio y gestión del muestreo de arbóreas nativas

El estudio se realizó en el Ejido El Limón de Cuauchichinola, Tepalcingo, Morelos, al interior de la Reserva de la Biosfera Sierra de Huautla, que cuenta con un clima cálido subhúmedo Aw₀”(w)(i’g y vegetación de selva baja caducifolia, la cual es típica de la parte alta de la cuenca hidrológica del Balsas; en él se realiza ganadería extensiva de subsistencia. En esta localidad, a través de talleres participativos de diagnóstico sobre uso local de árboles y mapeo de recursos forrajeros (Geilfus, 2002), los pobladores identificaron arboles mayormente consumidos por el ganado bovino. Una vez identificadas las especies arbóreas, se definieron los sitios de colecta de follaje de estas especies:

Agostadero de montaña (AM): denominación dada al área del agostadero que se encuentra en la zona montañosa de la localidad, con pendientes que van desde el 20 hasta el 70%. Es la zona que comprende la mayor parte de la superficie del ejido, en ella se lleva a cabo el pastoreo extensivo de bovinos sin manejo alguno, durante los meses de julio a diciembre.

Agostadero del caporal (AC): denominación dada al área del agostadero ubicada en el valle de la localidad con pendientes del 5 al 20%. Es una zona con una superficie de 200 ha en la que se lleva a cabo el pastoreo extensivo de bovinos durante los meses de enero y febrero, posteriormente se suministra forraje y pollinaza (marzo a junio).

Sistema silvopastoril (SSP): dos parcelas de 450 m² cada una, una de ellas con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit cv. Cunningham y la otra con *L. collinsii*, ambas asociadas a *Megathyrsus maximus* (Jacq.) B. K. Simon & S. W. L. Jacobs cv. Mombasa.

La colecta de follaje de las especies en El Limón, así como el secado y molido de las muestras se realizaron en dos eventos de muestreo, en octubre de 2019 y en agosto de 2021. Su procesamiento en el laboratorio se llevó a cabo de octubre de 2019 a febrero de 2020 y de febrero a julio de 2022 para cada evento de muestreo mencionado. En los sitios AM y AC se tomaron muestras del follaje de *G. ulmifolia*, *L. divaricatum* y *A. cochliacantha*. En el sitio AC adicionalmente, se tomaron muestras del follaje de *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth., *Lysiloma acapulcense* (Kunth) Benth., *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn. y de *L. leucocephala* (especie nativa), las cuales además de ser consumidas por el ganado, son

utilizadas para postes en la delimitación del área agrícola colindante con este sitio. En SSP se muestreó el follaje de *L. leucocephala* cv. Cunningham y *L. collinsii*.

Además del follaje de arbóreas, con fines de caracterizar nutricionalmente al estrato herbáceo, en los sitios AM y AC se tomaron muestras del follaje del componente herbáceo. En el sitio AC también se muestreó el follaje de la herbácea voluble *Nissolia fruticosa* Jacq. por su persistencia al inicio de la época seca, lo que hace que sea muy consumida en ese periodo. Así mismo, en el SSP se muestreó el follaje de la herbácea *M. maximus* cv. Mombasa. Para la colecta de las muestras del follaje de todas las especies se utilizó la técnica de pastoreo simulado (*hand plucking*; Le Du y Penning, 1982).

En el sitio AM se seleccionaron al azar cuatro transectos de 1 km de largo por 4 m de ancho en las zonas donde normalmente se lleva a cabo el pastoreo de bovinos. Estos fueron nombrados por los pobladores como Olicornio, Amate Prieto, Cerro Prieto y La Centella y se ubicaron al noreste, sureste, suroeste y noroeste del ejido (Figura 1). En cada uno de los transectos, las muestras del componente herbáceo (A) se tomaron cada 250 m, para ello se cortó todo el follaje existente en un cuadro de 0.25 m² a severidad de 5 cm. Así mismo, cada 100 m se tomaron muestras de todas las arbóreas de las especies *G. ulmifolia* (B), *L. divaricatum* (C) y *A. cochliacantha* (D) interceptadas en cada transecto, se colectó el follaje existente en los primeros 1.7 m de altura.

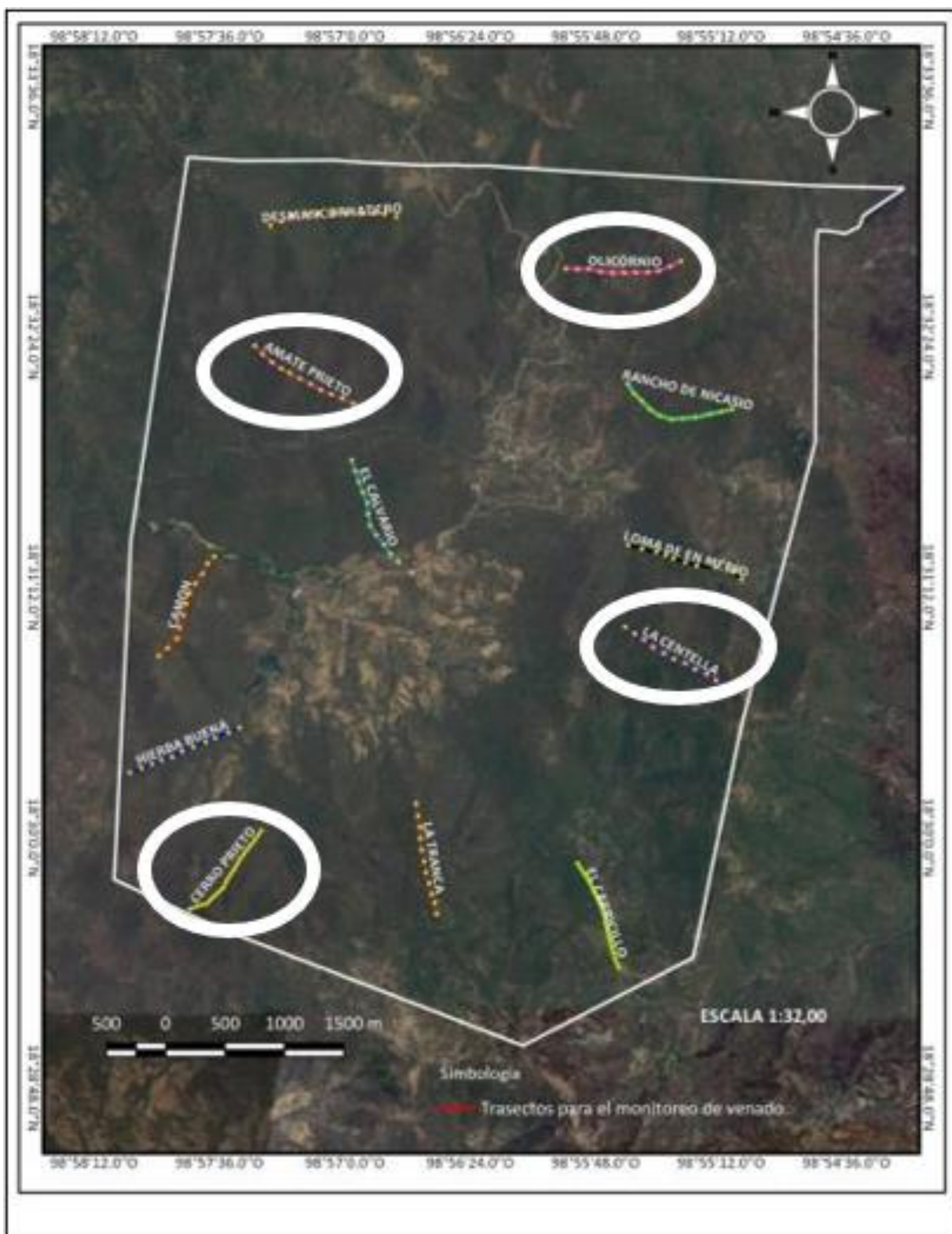


Figura 1. Distribución de transectos en El Limón, Tepalcingo, Morelos.

En el sitio AC se recorrieron 1.5 km del caporal y se tomaron tres muestras al azar del componente herbáceo (A) con los mismos criterios de muestreo que se aplicaron a este componente en el sitio AM. También, se tomaron muestras de follaje de todas las arbóreas encontradas de las especies *G. ulmifolia* (B), *L. divaricatum* (C), *A. cochliacantha* (D), *P. dulce* (E), *L. acapulcense* (F), *V. farnesiana* (G) y *L. leucocephala* (especie nativa; H), así como de la herbácea *N. fruticosa* (I), con los mismos criterios que en el sitio AM. En el SSP las arbóreas se muestrearon en zigzag en dos parcelas de 450 m², una con *L. leucocephala* cv. Cunningham (J) y otra con *L. collinsii* (L), con los mismos criterios aplicados a las arbóreas en los sitios AM y AC. En ambas parcelas el componente herbáceo estaba compuesto por *M. maximus* cv. Mombasa (M), de la cual se tomaron tres muestras en zigzag en cada parcela con los mismos criterios que el estrato herbáceo en los sitios AM y AC.

3.4.2 Procesamiento de las muestras y análisis de la información

Las muestras se procesaron en los laboratorios del Posgrado en Producción Animal y de Nutrición de Rumiantes de la Universidad Autónoma Chapingo. Se determinó materia seca, proteína cruda (Microkjeldahl con el factor de conversión 6.25; AOAC, 1990), FDA y FDN (Van Soest *et al.* 1991) y los minerales Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn (Fick *et al.*, 1979). Debido a la heterogeneidad de los sitios, considerando que no en todos se encontraron el mismo número de ejemplares por especie, los resultados de las variables de valor nutritivo (PC, FDA, FDN y minerales) se presentaron como medias de concentración por especie y por sitio de muestreo. No se realizaron comparaciones entre especies ni entre sitios de muestreo. Tomando como referencia la recomendación de NRC (2000) sobre niveles óptimos en las concentraciones de PC, FDA, FDN y minerales en la dieta de bovinos de 300 kg con una ganancia de peso de 1.2 kg/d, se definió si las concentraciones de las especies cumplían o no con estos niveles o incluso se encontraban por encima del nivel máximo tolerable (NT) reportado por NRC (2005) para el caso de los minerales. En ello se basó la discusión sobre el valor nutritivo de las especies. Adicionalmente, para identificar la similitud entre las variables de valor nutritivo (MS, PC, Ce, FDA, FDN, Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn) con base en el comportamiento de sus datos de concentración, así como la importancia que tiene cada una en el conjunto para apreciar el potencial de una especie en términos de valor nutritivo, se realizó un análisis de conglomerados (Clúster) con el método de Ward basado en la Distancia Euclidiana (Kumar *et al.*, 2009) en el que se asociaron las variables de valor nutritivo (MS, PC,

Ce, FDA, FDN, Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn) independientemente de la especie y sitio de muestreo. Lo anterior por medio del paquete estadístico R Studio Versión 4.2.1.

3.5 Resultados y Discusión

El Cuadro 1 muestra que considerando el nivel óptimo (NO) de PC recomendado por NRC (2000) en la dieta de bovinos de 300 kg con una ganancia de peso de 1.2 kg/d, todas las especies nativas a excepción de A y B en AM, B en AC, así como J y L en SSP cubrieron el requerimiento. En cuanto a los niveles de FDA y FDN todas las especies superaron los parámetros recomendados, a excepción de la FDA en J en SSP, que estuvo dentro del rango. Al respecto Russell *et al.* (1992) mencionaron que cuando la FDN del forraje es menor al 20% el rendimiento de la síntesis de proteína microbiana por parte de las bacterias del rumen disminuye en 2.5% por cada 1% de disminución en la FDN. Lo anterior sucede porque cuando el suministro de la FDN dietética se encuentra limitado, no se cubre el requisito de FDN efectiva, la cual se define como la proporción de la FDN que es eficaz para cubrir los requisitos de fibra que promueven la masticación y la secreción de saliva que funciona como buffer en el rumen evitando que su pH baje y proporcionando un ambiente idóneo para la actividad bacteriana (NRC, 2000). Ante ello, Pitt *et al.* (1996) definieron que en dietas mixtas o donde no se suministran ionóforos el requisito de FDN efectiva es del 20% de la materia seca consumida para mantener el pH del rumen superior a 6.2 y con ello maximizar la síntesis de proteína microbiana y digestión de la pared celular. Dado que Sniffen *et al.* (1992) estimaron que las fabáceas de alta calidad (18-21% de PC) y media calidad (<18% de PC) aportan en promedio un 80% de FDN efectiva como proporción de la FDN y considerando que las especies C, D, E, F, G, H, I, J, y L son fabáceas y estarían aportando al menos un 29% de FDN efectiva (C en AM con 36.2% de FDN); el consumo de estas estaría beneficiando el rendimiento de las bacterias del rumen por medio del aporte de fibra. Esto proporcionó una pauta para clarificar que no basta con definir si se cumple o no con un valor de NO recomendado para cada una de las concentraciones de las variables (PC, FDA, FDN, Ca, P, Mg, K, Na, Cu, Zn, Fe y Mn). La apreciación del potencial de las especies evaluadas en términos de valor nutritivo requiere ser integral y considerar las repercusiones de las interacciones de dichas variables en la nutrición del ganado bovino; tales como la influencia del contenido de fibra en el suministro de proteína metabolizable mediante su efecto en el rendimiento de la síntesis de proteína microbiana, así como las interacciones entre minerales.

El Ca superó el NO en el 94% de las especies, el 69% por encima del NT, solo M en SSP se encontró en el NO. El P fue deficiente en C y F en AC y L en SSP, el resto cubrió adecuadamente el NO sin llegar al NT. Se cubrió adecuadamente el NO de Mg, el 37% de las especies rebasaron el NT. El K se encontró deficiente solo en D en AC y en L en SSP. Hubo deficiencias de Na en todos los forrajes y de Cu y Zn en el 75 y 94% de las especies. Fe se encontró por encima del NO en todos los forrajes sin rebasar el NT. Mn estuvo por encima del NO en el 69% de las especies sin rebasar el NT y fue deficiente en C, D, E, F y G en AC.

Cuadro 1. Porcentaje de materia seca (MS) y concentraciones en base seca de proteína cruda (PC), cenizas (Ce), fibras detergentes neutro (FDN) y ácido (FDA) y minerales en especies vegetales en los sitios agostadero de montaña (AM), agostadero del caporal (AC) y sistema silvopastoril (SSP) en El Limón, Tepalcingo, Morelos.⁴

Especie	Sitio	MS (%)	PC (%)	Ce (%)	FDA (%)	FDN (%)	Ca (%)	P (%)	Relación Ca:P ⁵	Mg (%)	K (%)	Na (%)	Cu ppm	Zn ppm	Fe ppm	Mn ppm
Herbáceas																
A	AM	95.1	10.4	8.8	44.3	57.3	1.5	0.5	3.0	0.6	2	0.008	10.2	26.9	160.0	71.5
A	AC	94.1	15.5	6.1	35.4	58.0	1.0	0.3	3.3	0.6	2.3	0.007	7.0	18.0	103.5	41.5
I	AC	92.5	23.9	6.2	22.0	45.2	2.0	0.2	10.0	0.5	2.7	0.006	11.6	41.7	93.3	26.1
M	SSP	92.7	7.5	7.9	37.1	64.0	0.4	0.8	0.5	0.2	1.6	0.005	4.5	10.0	57.4	43.2
Arbóreas																
B	AM	94.7	11.5	7.5	33.7	53.4	2.2	0.4	5.5	0.5	1.2	0.008	13.3	12.4	75.0	68.4
B	AC	94.2	8.7	8.1	45.4	50.4	2.7	0.3	9.0	0.3	0.7	0.006	8.9	8.4	121.5	39.8
C	AM	94.8	14.3	5.3	21.1	36.2	1.7	0.6	2.8	0.3	0.7	0.011	9.0	13.9	86.8	62.6
C	AC	93.3	12.7	5.1	24.9	40.2	1.9	0.1	19.0	0.3	0.7	0.015	7.7	11.1	97.8	16.1
D	AM	94.4	16.0	5.8	35.4	48.0	1.6	0.6	2.7	0.4	0.8	0.009	6.2	14.8	111.3	34.3
D	AC	92.3	12.7	6.2	34.1	46.4	4.0	0.3	13.3	0.4	0.4	0.009	3.8	6.2	108.0	13
E	AC	93.6	19.8	6.6	40.4	57.1	1.2	0.2	6.0	0.3	1.3	0.003	9.9	23.7	93.3	3.9
F	AC	93.2	13.7	5.7	24.8	50.1	1.9	0.1	19.0	0.6	0.7	0.008	3.8	10.5	91.8	8.1
G	AC	93.2	18.2	8.1	31.0	46.6	3.1	0.2	15.5	0.4	0.9	0.005	3.5	11.1	99.8	2.2
H	AC	92.7	24.6	7.4	32.8	43.1	1.5	0.5	3.0	0.3	1.3	0.002	4.6	15.0	98.2	37.5
J	SSP	92.5	12.3	8.3	20.3	37.0	4.4	0.4	11.0	0.8	0.9	0.002	4.7	7.2	103.4	46.4
L	SSP	92.8	10.6	8.4	21.2	37.0	3.0	0.1	30.0	0.4	0.3	0.003	10.7	7.6	91.7	65.2
NO ⁶			12.6		17-21	23-33	0.4	0.2	1.5:1 - 2:1	0.2	0.7	0.07	10	30	50	20
NT ⁷							1.5	1.0		0.4	3.0		100	500	500	1000

A: componente herbáceo. B: *Guazuma ulmifolia*. C: *Lysiloma divaricatum*. D: *Acacia cochliacantha*. E: *Pithecellobium dulce*. F: *Lysiloma acapulcense*. G: *Vachellia farnesiana*. H: *Leucaena leucocephala* (especie nativa). I: *Nissolia fruticosa*. J: *Leucaena leucocephala* cv. Cunningham. L: *Leucaena collinsii*. M: *Megathyrus maximus* cv. Mombasa.

⁴Para la interpretación de los datos se tomó como referencia el NO y NT para las variables presentadas.

⁵Relación Ca:P recomendable en la dieta de bovinos (Puls, 1988).

⁶NO: nivel óptimo requerido en la dieta para bovinos de 300 kg con una ganancia de peso de 1.2 kg/d (NRC, 2000).

⁷NT: nivel máximo tolerable en ganado bovino (NRC, 2005).

En la Figura 2 se muestra el dendograma obtenido para la asociación de las variables de valor nutritivo estimadas. Las variables con una mayor similitud fueron FDA y FDN, así como K y Zn, las cuales fueron afines en más del 76% en el comportamiento de sus datos. Para el caso de las fibras, esto se podría haber esperado puesto que la FDA comprende una fracción de la FDN, por lo que la tendencia fue que, como se muestra en el Cuadro 1, las especies que tuvieron valores altos de FDA, también los tuvieron de FDN, lo cual ocurrió de la misma forma con valores menores. En cuanto a los minerales (Cuadro 1), en la mayoría de los forrajes evaluados la tendencia fue que los que tuvieron mayor cantidad de K presentaron los mayores contenidos de Zn, lo cual se repitió con los menores contenidos, tal fue el caso de P con Mn cuya similitud rebasó el 52%. Lo anterior puede ser muy útil cuando solo se cuente con los datos de la concentración de uno de esos minerales o fibras para las especies evaluadas, pues se puede inferir que si uno de ellos se encuentra deficiente es muy probable que el otro guarde la misma situación.

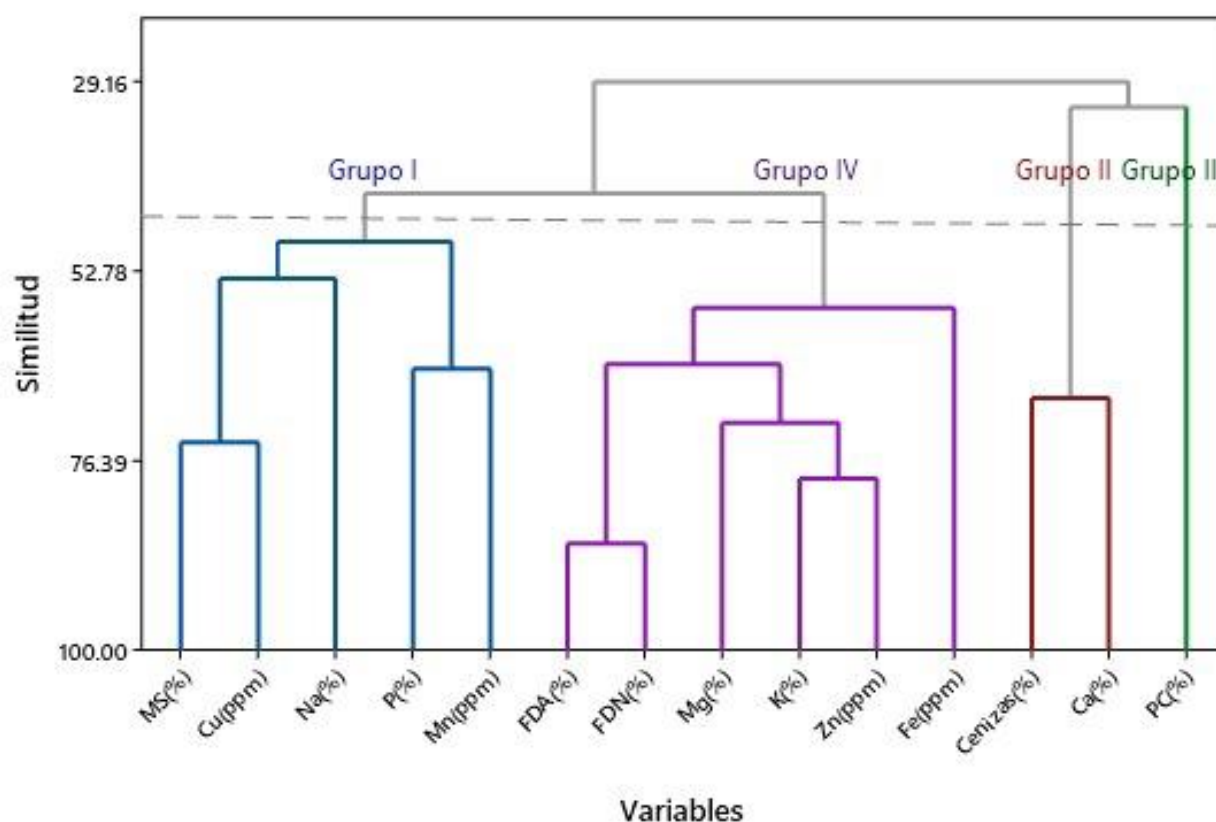


Figura 2. Dendograma para identificar la similitud entre las variables del valor nutritivo de forrajes en El Limón, Tepalcingo, Morelos.

Derivado del análisis presentado en la Figura 2, con base en su similitud (%), la partición final de las variables se realizó como se muestra en el Cuadro 2. Otro punto que se puede observar en dicha figura denotado por el eje horizontal es el valor de importancia de las variables para este análisis. Las que se encuentran del lado derecho (PC, Ca y Ce) encabezan la lista de las más importantes, mientras que las del lado izquierdo (MS, Cu y Na) se encuentran al final. Esto permitió definir que la discusión de los datos debía centrarse en las variables del extremo derecho de la Figura 2 y con ello emitir recomendaciones en términos del valor nutritivo de las especies evaluadas. A su vez, como se muestra en el Cuadro 2, eso se reflejó con la agrupación de esas variables en conglomerados donde solo se encuentran éstas (grupos II y III). Se puede considerar también que, en el área de estudio, en un escenario con recursos limitados para la determinación del perfil nutricional completo de las especies evaluadas, es confiable definir su calidad nutricional mediante la valoración del contenido de PC, Ca y Ce.

Cuadro 2. Grupos de variables del valor nutritivo de forrajes en el Limón, Tepalcingo, Morelos; según su similitud.

Grupo	Variables
I	MS (%) P (%) Na (%) Cu (ppm) Mn (ppm)
II	Cenizas (%) Ca (%)
III	PC (%)
IV	FDA (%) FDN (%) Mg (%) Zn (ppm) Fe (ppm)

Las variables determinadas con un mayor valor de importancia (PC, Ca y Ce) son componentes primordiales del valor nutritivo de los forrajes, pues reflejan el estado que guardan nutrientes fundamentales para el bienestar y productividad de los bovinos. Cubrir el NO de la PC dietética promueve un suministro adecuado de proteína metabolizable, la cual está constituida principalmente por la proteína no degradable en rumen de la dieta, la proteína microbiana sintetizada a partir de la proteína degradable en rumen, y en menor medida, por el suministro de proteína endógena (NASEM, 2021). La proteína metabolizable representa un recurso vital para los rumiantes, permite su mantenimiento, crecimiento, reproducción y lactación a través del aporte de aminoácidos absorbidos en el intestino (NASEM, 2021).

El follaje de las arbóreas que mostró una concentración igual o mayor al NO de PC para la engorda de bovinos (Cuadro 1) las denota como especies con potencial forrajero en estos términos. Por ello, la reforestación con estas especies sería una estrategia de implementación de forrajes suplementarios que propicie el mejoramiento del agostadero como recurso

alimenticio (Powell y Sánchez, 1979). El porcentaje de Ce en los forrajes comprende su parte inorgánica, incluye a los minerales que los componen y puede incluir residuos de la contaminación por polvo o tierra (NASEM, 2021). Su determinación en laboratorio es fundamental para aplicar las diversas metodologías de análisis de minerales (NRC, 2005). El contenido de Ce se relaciona inversamente con el contenido de carbohidratos no fibrosos y los nutrientes digestibles totales en los forrajes (NASEM, 2021). Dado que no se reporta un NO de Ce para los forrajes que consumen los bovinos, esta variable se analizó mediante su comparación con lo encontrado en la literatura para las especies de interés, eso permitió inferir si lo estimado se trataba de una composición típica o sugería la presencia de algún contaminante en caso de presentar valores altos. Este análisis se sumó a la valoración de especies con alto potencial forrajero en términos de PC.

Dada la relevancia del contenido de FDA y FDN en los forrajes para dimensionar su volumen con respecto a su ingesta, así como su digestibilidad, la cual es uno de los componentes que permite dimensionar su valor nutritivo (Van Soest *et al.* 1991), los datos obtenidos en este estudio también se discutieron junto con lo valorado para el contenido de PC en las arbóreas. Los altos contenidos de FDA y FDN en los forrajes pueden influir negativamente en el consumo voluntario y por consiguiente en el suministro de energía y proteína de la dieta (Navas *et al.*, 2020). Se ha demostrado que los pequeños rumiantes tienden a seleccionar forrajes con menores contenidos de FDN que los bovinos, lo cual impacta en el pH ruminal, la tasa de pasaje y la producción de ácidos grasos volátiles (Bettero *et al.* 2021). Por ende, es necesario considerar que los contenidos de fibras en los forrajes evaluados pueden servir como referencia para decidir si es factible introducir otro tipo de ganado en el agostadero en algún otro momento.

Las especies arbóreas que presentaron altos contenidos de PC fueron D en AM, así como, E, G y H en AC (Cuadro 1). Éstas han sido evaluadas por otros autores, quienes han constatado que tienden a presentar altos niveles de PC. La PC de E (Cuadro 1) fue mayor que lo calculado en bosque muy seco tropical por Apráez *et al.* (2017) para esa especie en la época lluviosa (18.2%) y menor a lo determinado en la época seca (23.3%). E mostró un menor contenido de Ce que lo mencionado por esos autores en la época lluviosa (8.5%) y mayor que en la época seca (5.6%). Las cantidades de FDA y FDN de E fueron mayores a las determinadas por dichos autores en la época lluviosa (31.3% de FDA y 49.3% de FDN) y seca (29.7% de FDA y 40.4%

de FDN). En términos generales los resultados obtenidos fueron muy similares a los de Apráez *et al.* (2017), por lo que se puede confirmar el potencial forrajero de dichas especies.

La PC, Ce, FDA y FDN de G (Cuadro 1) fueron mayores a lo estimado para esa especie en un matorral xerófilo por Zapata-Campos *et al.* (2020; 17.3, 7.3, 22.8 y 40.3% de PC, Ce, FDA y FDN). Lo cual, constata que la especie tiende a presentar alto contenido de PC aún en otros ecosistemas. En este estudio se evaluaron dos cultivares de *L. leucocephala* uno nativo (H) y otro cultivado (J), por lo que, al tratarse de la misma especie, ambos se compararon con la información generada por otros autores. El contenido de PC de H y J (Cuadro 1) fue menor que lo reportado por Gaviria *et al.* (2015; 29.4%) y por Cuartas *et al.* (2015; 27.6%) para la especie. A su vez, la PC en J fue menor a lo reportado por Trejo-Arista (2016; 21.6 – 22.7%), Harrison *et al.* (2015; 22.6%) y Zapata-Campos *et al.* (2020; 21.9%), mientras que en H fue mayor que en los tres estudios mencionados.

Por lo anterior, se puede inferir que para el enriquecimiento del agostadero en términos de PC es más recomendable la utilización de la arbórea nativa (H) que la cultivada (J). En cuanto al porcentaje de Ce, en H fue menor a lo reportado por Gaviria *et al.* (2015; 7.83%) para la especie, mientras que en J fue mayor. Harrison *et al.* (2015) y Zapata-Campos *et al.* (2020) informaron un 9.1 y 8.7% de Ce en la especie respectivamente, lo que fue mayor a lo estimado tanto para H como para J. Cuartas *et al.* (2015) obtuvieron un menor porcentaje de Ce (6.9%) que lo determinado para H y J. Dado que los resultados de Ce de H y J son muy parecidos a lo reportado en otros estudios, estos presentan el contenido típico de la especie. En cuanto a los contenidos de FDA y FDN en H, fueron mayores a los reportados por Gaviria *et al.* (2015; 22.0 y 36.8% de FDA y FDN) para la especie. A la vez, J presentó en mínima proporción, menor cantidad de FDA y mayor FDN que lo determinado por esos autores. Por otro lado, tanto H como J presentaron mayores valores de FDA y FDN que los determinados por Harrison *et al.* (2015; 16.0 y 22.2%) y por Cuartas *et al.* (2015; 12.3 y 32.4%) para la especie.

Se ha documentado que la inclusión de arbóreas leguminosas como H y J aporta beneficios al suelo, lo cual puede impactar positivamente en el rendimiento y calidad de las herbáceas asociadas. Lo anterior fue demostrado en sistemas silvopastoriles donde se incluyó a *L. leucocephala*, pues Bueno y Camargo (2015) reportaron un aporte al suelo de 250 kg de N/ha/7 meses. Bugarín *et al.* (2010), estimaron un incremento en la materia orgánica del suelo del SSP con dicha arbórea, de 1.68 a 1.94% al cabo de 14 meses. Azuara-Morales *et al.* (2020)

refirieron un mayor rendimiento de forraje de la herbácea asociada (*Digitaria eriantha* Steud. cv. Pangola; 16.0 vs 13.1 t MS/ha/año) en el SSP donde incluyeron una mayor densidad de *L. leucocephala* (25,000 plantas/ha vs 15,000 plantas/ha). Paciullo *et al.* (2021) determinaron que *Urochloa decumbens* tuvo un mayor contenido de PC en un SSP con la arbórea mencionada que en monocultivo (14.1 vs 11.7%). Por lo anterior, se puede considerar que la reforestación del agostadero con *L. leucocephala* es un área de oportunidad para mejorar la productividad y el contenido de PC del agostadero. De igual forma, dados los resultados observados por otros autores en SSP, se considera factible promover el establecimiento de estos con dicha arbórea en áreas degradadas.

Es destacable que se presentaron altos contenidos de PC en las arbóreas evaluadas a pesar de que en AM y AC se muestrearon algunas especies cercanas a la etapa reproductiva, condición propiciada por la carencia de un manejo del pastoreo en el agostadero, lo que genera una gran dispersión del ganado. Referente a ello, Navas *et al.* (2020) mencionaron que uno de los beneficios de la utilización de arbóreas forrajeras es que en ellas la pérdida de la calidad nutricional, ocasionada por la demora en la cosecha a partir de la edad de rebrote óptima, no ocurre tan rápidamente en comparación con las herbáceas.

Contrario a lo discutido anteriormente, la arbórea que no cubrió el NO de PC en los dos sitios donde fue muestreada fue B. Contrastando lo mostrado en el Cuadro 1 con otros estudios, el contenido de PC y de Ce de B tanto en AM como en AC fueron menores a lo reportado por Cuartas *et al.* (2015; 11.9% de PC y 11.7% de Ce) y por Mayren-Mendoza *et al.* (2018; 17.3% de PC y 11.3% de Ce) para la especie. Al mismo tiempo, los niveles de FDA y FDN en B en los dos sitios, fueron mayores que los determinados por esos autores (Cuartas *et al.*, 2015: 17.1 % de FDA y 29.0% de FDN; Mayren-Mendoza *et al.*, 2018: 31.9% de FDA y 49.9% de FDN). Esta amplia variación del contenido de PC en B encontrada en la literatura se puede considerar típico de la especie, pues Castro (2017), documentó rangos de 10.4 hasta 18.3% de PC en su follaje en una misma zona, lo cual se asoció con el tamaño y densidad de la arbórea. Si bien esta especie no parece muy atractiva en términos de PC, los pobladores mencionaron que su fruto es ampliamente consumido por el ganado. Estos frutos se encuentran disponibles en el agostadero de febrero a mayo, meses en los que, debido a la época de estiaje no existe forraje verde, por lo que dicho fruto representa un recurso alimenticio importante para los bovinos, lo cual denota que se trata de una especie con potencial forrajero.

Sobre la misma vía, el Cuadro 1 muestra que ninguna de las especies del SSP cubrió el NO de PC. Esto se asocia a que cuando se estableció este sistema, el suelo se encontraba degradado por la siembra de maíz en monocultivo que había acogido durante varias décadas. Este suelo presentó casi nula cubierta vegetal y erosión laminar en toda el área. A este respecto, Castelán *et al.* (2017) documentaron que en el suelo de un monocultivo de maíz se dio un mayor arrastre de sedimentos (37.9 t/ha/año) en comparación con su versión asociado a calabaza o avena (13.9 y 17.7 t/ha/año, respectivamente), lo que evidenció una mayor pérdida de nutrientes en el suelo del monocultivo. Por lo tanto, al estar en un suelo en el que, debido a su historial de uso, seguramente se había dado una pérdida de nutrientes importante, era predecible que se tuvieran bajos contenidos de PC en las especies del SSP. Al respecto, Navas *et al.* (2020), mencionaron que el valor nutritivo de las especies forrajeras está relacionado íntimamente con la calidad del suelo en que se desarrollan. Lo anterior fue confirmado por Vite *et al.* (2020) quienes obtuvieron para SSP en el mismo sitio parámetros bajo de N inorgánico aprovechable (15.8 mg/kg) y medio de materia orgánica (1.8%) de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

En cuanto al estrato herbáceo, el Cuadro 1 indica el buen potencial forrajero en términos de PC en A e I en AC, pues su contenido coincide con lo que se obtuvo en las especies arbóreas. A este respecto, en un ecosistema de selva mediana subperennifolia, Velázquez-Martínez *et al.* (2011) determinaron el contenido de PC en diversas herbáceas nativas y en el 64% de las especies que evaluaron fue de 14.9 a 18.9%. A la vez, en las herbáceas leguminosas nativas de un pastizal natural, Milano (2018) determinó contenidos de PC de 15 a 25%. Esto demuestra que las herbáceas nativas tienen una tendencia a presentar valores interesantes de PC y su conservación a partir de estrategias de manejo del pastoreo puede mejorar la oferta forrajera del agostadero y potenciar su aporte a la productividad del ganado.

Lo anterior cobra relevancia al denotar la superioridad de las herbáceas nativas con respecto a la herbácea cultivada que se evaluó (M; Cuadro 1). El contenido de PC de M fue menor a lo reportado por Gaviria *et al.* (2015; 11.4%) en una mezcla de *M. maximus* y *Cynodon plectostachyus* (K. Schum.) Pilger. Así mismo, fue menor que lo referido por Cuartas *et al.* (2015), quienes determinaron para *M. maximus* 10.6% de PC cuando estuvo asociada a *L. leucocephala* y 8.9% asociada a *G. ulmifolia*. Este efecto sobre la pastura asociada refuerza la importancia de considerar la reforestación con *L. leucocephala* para la mejora del agostadero. Gaviria *et al.* (2015) determinaron un mayor contenido de Ce (13.3%) para una mezcla de *M.*

maximus y *C. plectostachyus* que lo estimado para M (Cuadro1). Cuartas *et al.* (2015) también obtuvieron un mayor porcentaje de Ce para *M. maximus* cuando estuvo asociada a *L. leucocephala* (9.5%) y asociada a *G. ulmifolia* (10.9%). Las cantidades de FDA y FDN en M fueron menores a lo estimado por Gaviria *et al.* (2015; 42.7% de FDA y 66.8% de FDN) para una mezcla de *M. maximus* y *C. plectostachyus*. El contenido de FDA de M fue mayor a lo reportado para la especie por Cuartas *et al.* (2015), mientras que la FDN fue menor, pues determinaron un 36.2% de FDA y 66.3% de FDN cuando estuvo asociada a *L. leucocephala* y un 36.5% de FDA y 67.5% de FDN asociada a *G. ulmifolia*. En general se puede hablar de un contenido típico de Ce, FDA y FDN de la especie pues los valores mencionados por los autores citados no distan mucho de los obtenidos en este estudio para M.

En cuanto a los niveles de Ca, un suministro adecuado en la dieta permite que se lleven a cabo exitosamente los procesos en los que es participe este mineral en el organismo de los animales. Estos son: fungir como componente de la leche, la transmisión de impulsos nerviosos, la formación de tejidos esqueléticos, la coagulación sanguínea, la contracción del músculo esquelético y cardiaco, así como transmitir información como segundo mensajero de la superficie al interior de la célula (NRC, 2005). En este trabajo, las arbóreas tendieron a mostrar excesos de Ca, algunas incluso estuvieron por encima del NT. Respecto a ello, NASEM (2021) mencionó que el consumo excesivo de Ca en la dieta generalmente no está asociado a toxicidad específica, no obstante, intercede con la absorción de microminerales, principalmente de Zn y Se. Esto pone de manifiesto la importancia de suplementar Se y Zn a los animales que se encuentren pastoreando sobre el agostadero de El Limón, pues además todas las arbóreas estudiadas mostraron deficiencias de Zn (Cuadro 1).

También, NRC (2005) comentó que cuando el suministro de P en la dieta es marginalmente adecuado, el exceso de Ca dietético puede limitar su disponibilidad. En general, la relación mineral antes mencionada no es un problema en este estudio, pues la mayoría de las arbóreas mostraron contenidos de P por encima del NO (Cuadro 1), además el exceso de P influye en la absorción del Ca por el animal (Suttle, 2010). Al tratarse de minerales que están íntimamente relacionados en su metabolismo, es importante considerar su interacción. Al respecto, Puls (1988) mencionó que la relación Ca:P recomendable en la dieta es de 1.5:1 - 2:1. Considerando los datos mostrados en el Cuadro 1, se presentó una tendencia a altas relaciones Ca:P en todas las especies evaluadas, a excepción de M (0.5:1, lo cual fue igual a lo estimado por Trejo-Arista, 2016 para esa especie). Si bien es cierto que un alto contenido de Ca en la dieta

no reporta problemas de toxicidad para los rumiantes, considerando su interferencia para la absorción de otros minerales, las arbóreas con mayor potencial forrajero en este aspecto, fueron las que contaron con una relación Ca:P más cercana a lo recomendado. En este sentido, C (2.8:1) y D (2.7:1) en AM, así como H (3:1) en AC presentaron las relaciones Ca:P más cercanas, por lo que es aconsejable su establecimiento para equilibrar el suministro de estos minerales en el agostadero.

En general, las arbóreas que se muestrearon en AM presentaron las relaciones más cercanas a la recomendación, la más alta fue B (5.5:1), mientras que en AC la mayoría se encontró por encima de 5:1 a excepción de H (3:1), llegando incluso hasta 19:1 en C y F, en el SSP también se obtuvieron relaciones muy altas, 11:1 para J y 30:1 para L. Se puede deducir que esto se debió al contenido de minerales en el suelo, pues como lo mencionaron Escobar *et al.* (2020) y Navas-Panadero (2019) las condiciones químicas del suelo y la disponibilidad de bases impacta en el valor nutritivo de las plantas. Pese a ello, en AC donde la tendencia de las arbóreas fue mostrar relaciones Ca:P muy altas, H tuvo una relación Ca:P muy cercana a lo recomendado (3:1) aun cuando la misma especie en su versión cultivada (J) no mostró el mismo equilibrio en otro sitio con la misma problemática (SSP). Esto muestra que H puede ser una de las mejores opciones para reforestar áreas del agostadero donde se tengan problemas en el balance de Ca y P en las plantas con respecto a lo requerido por los bovinos.

Los contenidos de Ca y P en las especies evaluadas se han documentado por diversos autores, como se ha mencionado estos pueden ser muy variables dependiendo de las propiedades químicas del suelo en que se desarrollan los forrajes, sin embargo, se realizaron algunas comparaciones con los datos mostrados en el Cuadro 1. Los niveles de Ca y P en B en los dos sitios donde fue muestreada fueron mayores a lo reportado por Cuartas *et al.* (2015; 1.5% de Ca y 0.27% de P) para la especie, sin embargo, la relación Ca:P obtenida por esos autores (5.5:1) fue igual a la que presentó la arbórea en AM (5.5:1) y menor a la obtenida en AC (9:1). Los porcentajes de Ca y P de G fueron mayores a lo constatado por Zapata-Campos *et al.* (2020; 0.54% de Ca y 0.16% de P) para la especie, así mismo la relación Ca:P (15.5:1) fue mayor a la reportada por esos autores (3.3:1) que encontraron un mayor equilibrio de esos minerales. Los contenidos de Ca y P en H y J rebasaron lo obtenido por Gaviria *et al.* (2015), Cuartas *et al.* (2015) y Zapata-Campos *et al.* (2020) que informaron un 1.2, 1.4 y 0.62% de Ca y 0.25, 0.21 y 0.15% de P, respectivamente, para *L. leucocephala*. A su vez, las relaciones Ca:P obtenidas por dichos autores en orden de mención fueron 4.8:1, 6.6:1 y 4.3:1, las cuales

estuvieron por encima de lo calculado para H (3:1) y por debajo de lo estimado para J (11:1). Lo anterior muestra que en general existe una tendencia a altas relaciones Ca:P en las especies arbóreas mencionadas.

Las herbáceas evaluadas mostraron contenidos de Ca y P más equilibrados con respecto a los requisitos en la dieta de los bovinos. A en AM (3:1) y en AC (3.3:1) tuvo relaciones Ca:P muy cercanas a la recomendación (1.5:1 - 2:1). Por lo tanto, se enfatiza la necesidad de implementar estrategias de manejo del pastoreo que permitan la preservación del estrato herbáceo en el agostadero para que con ello también se mejore el equilibrio de Ca y P en la dieta del ganado en pastoreo. En cuanto a la herbácea cultivada, M fue la única especie que no rebasó el NO de Ca, el cual estuvo ligeramente por debajo de lo determinado por Gaviria *et al.* (2015; 0.46%) para una mezcla de *M. maximus* y *C. plectostachyus* y fue menor a lo reportado por Cuartas *et al.* (2015) para *M. maximus* cuando estuvo asociada a *L. leucocephala* (0.86%) y asociada a *G. ulmifolia* (0.59%). El porcentaje de P en M fue mayor a lo reportado por Gaviria *et al.* (2015; 0.22%) para la mezcla mencionada anteriormente y estuvo por encima de lo referido por Cuartas *et al.* (2015) para la especie cuando estuvo asociada a *L. leucocephala* (0.15%) y asociada a *G. ulmifolia* (0.17%). En cuanto a la relación Ca:P de M, fue la única especie que mostró un valor por debajo de lo recomendado (0.5:1). Esta fue menor a la reportada por Gaviria *et al.* (2015; 2:1) quien encontró una relación ideal en la mezcla evaluada antes mencionada y menor a lo calculado por Cuartas *et al.* (2015) para la especie cuando estuvo asociada a *L. leucocephala* (5.7:1) y asociada a *G. ulmifolia* (3.4:1). Lo anterior denota que la asociación de esta herbácea a las arbóreas del SSP promueve un equilibrio en el aporte de Ca y P en ese agroecosistema, pues J y L mostraron relaciones Ca:P muy altas (11:1 y 30:1 respectivamente).

En cuanto al nivel de Mg en la dieta, suplir el NO es fundamental para que se realicen de manera adecuada las funciones en las que participa este mineral. Estas son la conducción nerviosa, la función muscular, la formación de minerales óseos, fungir como cofactor enzimático en las rutas metabólicas principales, así como involucrarse en la homeostasis del Ca y el P (NASEM, 2021). A su vez, debido a que el Mg en los huesos no puede ser utilizado en caso de déficit, para mantener su concentración en plasma se deben suplir sus requisitos mediante la absorción del Mg de la dieta, lo cual, ocurre principalmente en el rumen (NASEM, 2021; Ahmed *et al.*, 2021). Para este estudio, puede parecer preocupante el hecho de que todas las especies a excepción de M rebasaron el NO de Mg e incluso algunas estuvieron por

encima del NT. Esto no es así, puesto que el transporte ruminal del Mg está limitado por altas concentraciones de K en la dieta, aumentos repentinos de amoníaco, el pH, la energía, el aumento de ácidos grasos y la concentración de ácidos orgánicos (Martens, *et al.* 2018; Pinotti, *et al.*, 2021; Reinhardt *et al.*, 1988).

En esta vía, el contenido de K en los forrajes estuvo por encima del NO en la mayoría de las especies evaluadas, varias se encuentran en el NO y solo dos resultaron deficientes (Cuadro 1). Así mismo, Suttle (2010) mencionó que cuando los forrajes contienen más del 1% de potasio se debe considerar duplicar los requisitos de magnesio para evitar la incidencia de tetania de los pastos. Como se muestra en el Cuadro 1, el 83% de las especies que rebasaron el NT de Mg superaron el 1% de K. Adicional a ello, Martens *et al.* (2018) comentaron que el consumo inadecuado de Na incrementa la concentración de K en el fluido ruminal, lo que afecta la absorción de Mg y como se muestra en el Cuadro 1, el Na estuvo deficiente en todas las especies evaluadas. Lo anterior pone de manifiesto que los excesos de Mg pueden ser regulados por el estado de otros minerales en la dieta que limitan su absorción, como son K y Na. Adicionalmente, NASEM (2021) señaló que debido a que el ganado puede excretar altas cantidades de Mg vía orina, no se han documentado problemas de toxicidad. A la vez, NRC (2005) mencionó que solamente se presentan disminuciones en el consumo voluntario de alimento y digestibilidad de la dieta, así como diarrea osmótica cuando el Mg dietético rebasa el 1%. Si bien en el SSP la herbácea (M) se encontró en una posición contraria, mostrando un alto contenido de K y el Mg apenas en el NO, al estar asociada con J y L es poco probable que represente un desafío para el ganado, pues el suministro de esos minerales podrá equilibrarse por el aporte de las arbóreas. Lo cual, evidencia una de las ventajas del establecimiento de sistemas ganaderos más diversos que no solo permiten la restauración de áreas degradadas por sistemas convencionales, sino que también representan un recurso alimenticio con alto potencial para la productividad.

Acerca de las concentraciones de K en los forrajes evaluados, su comportamiento fue variable, la tendencia fue cubrir el NO con excesos en la mayoría y solo deficiencia en dos especies (Cuadro 1). NASEM (2021) mencionó que, para no comprometer la productividad del ganado, el K debe suplirse diariamente puesto que se almacena muy poco y cumple un papel fundamental en el equilibrio hídrico, la contracción muscular, la presión osmótica, la transmisión de impulsos nerviosos, el transporte de O₂ y CO₂, la regulación ácido-base y funge como activador o cofactor enzimático. Al respecto de los contenidos de Mg y K en las arbóreas

evaluadas se ha sustentado que en general tampoco representan un desafío para el ganado, sin embargo, debido a la variabilidad que presentaron, se debe considerar la complementariedad entre las especies para el diseño de asociaciones que promuevan un equilibrio en el aporte de estos minerales a la dieta y con ello, el enriquecimiento del agostadero como recurso alimenticio para los bovinos. Respecto a lo evaluado por otros autores, comparando lo obtenido para G, H y J (Cuadro 1), Zapata-Campos *et al.* (2020) obtuvieron menores porcentajes de Mg (0.15% *V. farnesiana*; 0.19% *L. leucocephala*) y K (0.49% *V. farnesiana*; 0.55% *L. leucocephala*).

Sobre los contenidos de Na estimados, todas las especies fueron deficientes (Cuadro 1), esto se asoció a que este mineral no es un elemento esencial para las plantas y su presencia en el suelo les ocasiona estrés osmótico y toxicidad iónica, lo que puede resultar en bajos rendimientos de biomasa forrajera, así mismo es de fácil lixiviación en el suelo e influye en su pH (Safdar *et al.*, 2019; Santander *et al.*, 2019). Por lo anterior, la suplementación mineral del Na se considera necesaria en el agostadero a nivel general para mantener sus niveles en el plasma y con ello, el balance osmótico en el animal, así como el balance ácido – base (Suttle, 2010). Respecto a la homeostasis de este mineral, el Na y el K pueden intercambiarse de manera que la excreción de K incrementa en animales con deficiencias de Na para que puedan subsistir, por lo que se debe asegurar un adecuado suministro de K (NASEM, 2021). Respecto a los microminerales, en general se presentaron deficiencias de Cu y Zn, por lo que se considera esencial su suplementación mediante el ofrecimiento de una premezcla mineral al ganado para preservar las funciones en las que estos antioxidantes son participes. Por un lado, el Cu forma parte de diversas proteínas, participa en el metabolismo del Fe, es necesario para la síntesis de hemoglobina y junto con el Zn componen a la super óxido dismutasa que protege a las células de las especies reactivas de oxígeno (NASEM, 2021).

Por otro lado, el Zn forma parte de más de 200 enzimas, está implicado en muchos aspectos del sistema inmunológico, en la regulación hormonal y genética, en el metabolismo de los nutrientes, en la apoptosis y la neurotransmisión (NASEM, 2021; Palomares, 2022; Zhang *et al.*, 2022). La necesidad de suplementación de Cu y Zn cobra mayor relevancia debido a su interacción con otros minerales. Para el caso del Cu, Yu *et al.* (1994) documentaron que altas concentraciones de Fe dietético limitan su absorción, por lo que se corre el riesgo de que la deficiencia de este mineral se vea aún más agravada dado que el Fe se encontró por encima del NO en todos los forrajes. En el caso del Zn, como se mencionó anteriormente, cuando este

se suple en niveles marginales, el exceso de Ca dietético puede reducir su disponibilidad (NASEM, 2021). Dado que en general se obtuvieron excesos de Ca y deficiencias de Zn, no se debe pasar por alto el riesgo de no suplementar Zn. Cabe señalar que una especie con buen potencial forrajero en este ámbito es I, pues fue la única que no mostró deficiencias de Zn ni de Cu, al tratarse de una especie voluble, es aconsejable propagarla en el agostadero con el objetivo de paliar las deficiencias de estos minerales.

Como se ha mencionado, el Fe se encontró en niveles superiores al NO en todas las especies (Cuadro 1), sin embargo, NASEM (2021) mencionó que debido a su baja disponibilidad es poco probable que cause problemas cuando proviene de forrajes. No obstante, debido a su interacción con el Cu, descrita anteriormente, se debe estar atento a los signos de deficiencia de Cu, entre ellos el más notorio es la pérdida de pigmentación en el pelaje de los bovinos (Suttle, 2010). En cuanto al Mn, sus niveles fueron variables en las especies estudiadas (Cuadro 1), en la mayoría se encontró por encima del NO, pero también hubo especies con deficiencias importantes, como E y G. Todas las especies deficientes se encontraron en AC, esto se puede asociar al estado del Mn en el suelo, pues como se ha mencionado, sus propiedades químicas influyen en el valor nutritivo de las plantas (Escobar *et al.*, 2020; Navas-Panadero, 2019). Por lo anterior, las especies arbóreas con buen potencial forrajero en términos de contenido de Mn son B y H, pues independientemente del sitio no mostraron deficiencias de Mn, por lo que, para equilibrar el aporte de este mineral en AC, se recomienda incrementar su densidad en ese sitio. A ellas, se puede sumar la herbácea I, pues tampoco mostró deficiencias de este mineral. La importancia de suplir adecuadamente los requisitos de Mn dietético radica en que este es un cofactor en un gran número de enzimas y proteínas que se requieren para el metabolismo de aminoácidos, carbohidratos y lípidos, por lo que es requerido por todos los sistemas del cuerpo (NASEM, 2021). A su vez, su deficiencia puede impactar fuertemente en el desarrollo del feto, pues podría propiciar el nacimiento de becerros con condrodisplasia (Schwartz *et al.*, 2023).

Independientemente de las asociaciones que se puedan diseñar con las arbóreas evaluadas para la reforestación del agostadero, se deben suplementar Na, Cu, Zn y Se. Esto puede ser mediante el ofrecimiento de una premezcla en saladeros mientras el ganado se encuentra pastoreando. Así mismo, después del análisis de todas las variables evaluadas, la arbórea que presentó el mayor potencial forrajero fue H. Esto debido a que fue considerada como especie con buen potencial forrajero en varios ámbitos, pues mostró alto contenido de PC, una relación

Ca:P cercana a lo recomendado y ninguno de los minerales determinados en ella rebaso el NT. Además, solo mostró deficiencias en los minerales que tuvieron este comportamiento de forma generalizada. En este sentido, destaca la herbácea I, pues además de mostrar alto contenido de PC, se infiere que su propagación podría impactar positivamente en el balance mineral del agostadero, pues fue una excepción a la regla con sus contenidos de Cu, Zn y Mn.

3.6 Conclusión

Se identificaron arbóreas nativas con buen potencial forrajero que pueden considerarse aptas para proveer follaje con adecuado nivel de PC, FDA y FDN. A la vez, mediante el diseño de asociaciones entre ellas, que consideren su complementariedad para subsanar los desafíos nutricionales que suponen las interacciones entre minerales, se podría fortalecer la aptitud del agostadero nativo de selva baja caducifolia como recurso alimenticio para el ganado bovino. De manera general, hubo concentraciones altas de Ca y deficiencias de Na, Cu y Zn en las arbóreas evaluadas, por lo que se considera fundamental la suplementación de Se, Na, Cu y Zn a través del ofrecimiento de una premezcla al ganado que se encuentra pastoreando en el agostadero de El Limón de Cuauchichinola, Tepalcingo, Morelos.

3.7 Agradecimientos

Se agradece al Ejido El Limón de Cuauchichinola, a la Universidad Autónoma Chapingo y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por facilitar los espacios, el financiamiento y los medios digitales para la realización de este trabajo.

3.8 Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

3.9 Referencias bibliográficas

Aguilar-Jiménez, J. R., Aguilar-Jiménez, C. E., Guevara-Hernández, F., Galdámez-Galdámez, J., Martínez-Aguilar, F., La O-Arias, M. A., et al. Clasificación y caracterización de los sistemas familiares de producción bovina de la región frailesca de Chiapas, México, con base en el aporte de la ganadería al ingreso familiar. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(1): 1-24, 2023. DOI: <http://doi.org/10.56369/tsaes.4131>

Ahmed, M. H., Wilkens, M. R., Ganter, M. & Breves, G. Serum parameters related to mineral homeostasis and energy metabolism in ewes kept on different dietary magnesium supply during the transition period. *Research in Veterinary Science*, 134: 19-26, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2020.11.016>

Apráez, G. E., Gálvez, A. L. & Navia, E. J. F. Evaluación nutricional de arbóreas y arbustivas de bosque muy seco tropical (bms-T) en producción bovina. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1): 98-107, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.173401.66>

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. (15th ed.). Arlington, Virginia, USA: AOAC International, vol.1, p. 70. <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/aoac.methods.1.1990.pdf>, 1990.

Ballesteros-Correa, J. & Pérez-Torres, J. Silvopastoral and conventional management of extensive livestock and the diversity of bats in fragments of tropical dry forest in Córdoba, Colombia. *Agroforestry Systems*, 96: 589–601, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00698-4>

Bettero, V. P., Campos, A. F., Dib, V., Del Valle, T. A., Zilio, E. M. C., Teixeira, I. A. M. A., et al. Indigestible neutral detergent fiber evaluation with incubation in different species. *Archivos de Zootecnia*, 70(269): 14-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21071/az.v70i269.5413>

Bueno, L. L. & Camargo, G. J. C. Nitrógeno edáfico y nodulación de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit en sistemas silvopastoriles. *Acta Agronómica*, 64(4): 349-354, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v64n4.45362>

Bugarín, J., Bojórquez, J. I., Lemus, C., Murray, R. M., Hernández, A., Ontiveros, H., et al. Comportamiento de algunas propiedades fisicoquímicas del suelo con diferente sistema silvopastoril en la llanura norte de Nayarit. *Cultivos Tropicales*, 31(2): 48-55. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/547>, 2010.

Castelán, V. R., López, T. L. C., Tamariz, F. J. V., Linares, F. G. & Cruz M. A. Erosión y pérdida de nutrientes en diferentes sistemas agrícolas de una microcuenca en la zona periurbana de la ciudad de Puebla, México. *Terra Latinoamericana*, 35(3): 229-235, 2017. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v35i3.134>

Castro, C. S. J. *Evaluación del potencial productivo de seis especies de árboles forrajeros para la alimentación de rumiantes en la zona central del estado de Sinaloa*. Tesis presentada en opción al grado científico de Maestro en Ciencias en Sistemas de Producción Animal. Baja California, México: Universidad Autónoma de Baja California. <https://hdl.handle.net/20.500.12930/2429>, 2017.

Contreras-Santos, J. L., Falla-Guzmán, C. K., Rodríguez, J. L., Fernando-Garrido, J., Martínez-Atencia, J., & Aguayo-Ulloa, L. Reserva de carbono en sistemas silvopastoriles: Un estudio en el Medio Sinú, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 34(1): 49138. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v34n1/1659-1321-am-34-01-00008.pdf>, 2023.

Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., Cadena-Torres, J. & Fallas-Guzmán, C. K. Evaluación del carbono acumulado en suelo en sistemas silvopastoriles del Caribe Colombiano. *Agronomía Costarricense*, 44(1): 29-41, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.39999>

Cuartas, C. C. A., Naranjo, R. J. F., Tarazona M. A. M., Correa, L. G. A. & Barahona, R. R. Dry matter and nutrient intake and diet composition in *Leucaena leucocephala* - based intensive silvopastoral systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18(3): 303-311. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2125>, 2015.

De Bernardi, M., Priano, M. E., Fusé, V. S., Fernández, M. E., Gyenge, J., Guzmán, S. A., et al. High Methane Uptake from Soils of Low and High Density Radiata Pine Afforestations Compared to Herbaceous Systems. *Journal of Sustainable Forestry*, 40(1): 99-109, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1745653>

Escobar, M. I., Navas, P. A., Medina, C. A., Corrales, A. J. D., Tenjo, A. I. & Borrás, S. L. M. Efecto de prácticas agroecológicas sobre características del suelo en un sistema de lechería especializada del trópico alto colombiano. *Livestock Research for Rural Development*, 32(4). <https://www.researchgate.net/publication/340998749>, 2020.

Fick, K. R., McDowell, L. R., Miles, P. H., Wilkinson, N. S., Funk, J. D., Conrad, J. H., et al. *Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales*. (2da ed.). Florida, Estados Unidos: Universidad de Florida, 1979.

Gaviria, X., Rivera, J. & Barahona, R. Calidad nutricional y fraccionamiento de carbohidratos y proteína en los componentes forrajeros de un sistema silvopastoril intensivo. *Pastos y Forrajes*, 38(2): 194-201. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269139251007>, 2015.

Geilfus, F. *80 herramientas para el desarrollo participativo: Diagnostico, Planificación, Monitoreo y Evaluación*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). <https://ejoventut.gencat.cat/permalink/aac2bb0c-2a0c-11e4-bcfe-005056924a59>, 2002.

Gómez, V. J., Cobos, M. F. & Hasang, M. E. Sostenibilidad de los sistemas de producción de ganadería extensiva. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 4(CIEIS2019): 180-195. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7368619>, 2019.

Gutiérrez-Bermúdez, C. del C., Mendieta-Araica, B. G. & Noguera-Talavera, Á. J. Composición trófica de la macrofauna edáfica en sistemas ganaderos en el Corredor Seco de Nicaragua. *Pastos y Forrajes*, 43(1): 32-40. https://www.researchgate.net/publication/348407079_Composicion_trofica_de_la_macrofauna_edafica_en_sistemas_ganaderos_en_el_Corredor_Seco_de_Nicaragua, 2020.

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*. *Agricultural Systems*, 136: 138-146, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.03.003>

Kumar, B., Lal, G. M., Upadhyay, R. & Upadhyay, A. Genetic Variability, Diversity and Association of Quantitative Traits with Grain Yield in Bread Wheat (*Triticum Aestivum* L.). *Asian Journal of Agricultural Sciences*, 1(1): 4-6. <https://www.researchgate.net/publication/235761044>, 2009.

Landholm, D. M., Pradhan, P., Wegmann, P., Romero, S. M. A., Suárez, S. J. C. & Kropp, J. P. Reducing deforestation and improving livestock productivity: greenhouse gas mitigation potential of silvopastoral systems in Caquetá. *Environmental Research Letters*, 14: 114007, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3db6>

Le Du, Y. L. P. & Penning, P. D. Animal based techniques for estimating herbage intake. In: J. D. Leaver, ed. *Herbage Intake Handbook*. Berkshire, United Kingdom: The British Grassland Society, p. 37 – 75, 1982.

Mayren-Mendoza, F. J., Rojas-García, A. R., Maldonado-Peralta, M. A., Ramírez-Reynoso, O., Herrera-Pérez, J., Torres-Salado, N., et al. Comportamiento productivo de ovinos Pelibuey en pastoreo suplementados con follaje de *Guazuma ulmifolia* Lam. *Agroproductividad*, 11(5): 29-33.

http://www.ri.uagro.mx:8080/bitstream/handle/uagro/1345/AT_14241_18.pdf?sequence=1&isAllowed=y, 2018

Martens, H., Leonhard-Marek, S., Röntgen, M. & Stumpff, F. Magnesium homeostasis in cattle: Absorption and excretion. *Nutrition Research Reviews*, 31(1): 114-130, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0954422417000257>

Milano, C. *Leguminosas herbáceas nativas: una alternativa para la restauración de pastizales y suelos degradados en el sudoeste bonaerense*. Tesis presentada en opción al grado científico de Magíster en Ciencias Agrarias. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/4439>, 2018.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM). *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition*. Washington, D.C., USA: The National Academies Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17226/25806>

National Research Council (NRC). *Mineral Tolerance of Animals: Second Revised Edition*. Washington, D.C., USA: The National Academies Press, 2005. DOI: <https://doi.org/10.17226/11309>

National Research Council (NRC). *Nutrient Requirements of Beef Cattle: Seventh Revised Edition*. Washington, D.C., USA: The National Academies Press, 2000. DOI: <https://doi.org/10.17226/9791>

Navas-Panadero, A. Bancos forrajeros de *Moringa oleifera*, en condiciones de bosque húmedo tropical. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 20(2): 207-218, 2019. DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol20_num2_art:1457

Navas, P. A., Daza, C. J. I. & Montaña, B. V. Desempeño de bancos forrajeros de *Cratylia argentea* (Desv.) Kuntze, en suelos degradados en el departamento de Casanare. *Revista de Medicina Veterinaria*, 1(39): 29-42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19052/mv.vol1.iss39.3>

Paciullo, D. S. C., Fernandes, P. B., Carvalho, C. A. B., Morenz, M. J. F., Lima, M. A., Maurício, R. M., *et al.* Pasture and animal production in silvopastoral and open pasture systems managed with crossbred dairy heifers. *Livestock Science*, 245: 104426, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104426>

Palomares, R. A. Trace Minerals Supplementation with Great Impact on Beef Cattle Immunity and Health. *Animals*, 12(20): 2839, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12202839>

Papachristou, T. G., Platis, P. D., Papachristou, I., Samara, T., Spanos, I., Chavales, E., *et al.* How the structure and form of vegetation in a black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) silvopastoral system influences tree growth, forage mass and its nutrient content. *Agroforestry Systems*, 94: 2317-2330, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00552-z>

Peña-Domene, M., Ayestarán-Hernández, L. M., Márquez-Torres, J. F., Martínez-Monroy, F., Rivas-Alonso, E., Carrasco-Carballido, P. V., *et al.* Sistemas silvopastoriles enriquecidos: una propuesta para integrar la conservación en la producción ganadera en comunidades rurales de Los Tuxtlas, México. *Acta Botánica Mexicana*, 129: e1925, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm129.2022.1925>

Pérez-Sánchez, E., Hernández, H. E., Jiménez-Trujillo, J. A., Betanzos-Simón, J.E., Casasola-Coto, F., Martínez-Salinas, A., *et al.* Reconversión de ganadería convencional a silvopastoril: Estudio de caso rancho El Once en Campeche, México. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 25(3): 174-175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.53897/RevAIA.21.25.46>

Pinotti, L., Manoni, M., Ferrari, L., Tretola, M., Cazzola, R. & Givens, I. The Contribution of Dietary Magnesium in Farm Animals and Human Nutrition. *Nutrients*, 13(2): 509, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu13020509>

Pitt, R. E., Van Kessel, J. S., Fox, D. G., Pell, A. N., Barry, M. C. & Van Soest, P. J. Prediction of ruminal volatile fatty acids and pH within the net carbohydrate and protein system. *Journal of Animal Science*, 74(1): 226-44, 1996. DOI: <https://doi.org/10.2527/1996.741226x>

Powell, J. & Sánchez, E. J. Planeación de un manejo de agostaderos mediante el empleo de forrajes suplementarios. *Rangelands*, 1(5): 196-197. <https://journals.uair.arizona.edu/index.php/rangelands/article/viewFile/9917/9529>, 1979.

Puls, R. *Mineral Levels in Animal Health: Diagnostic Data*. British Columbia, Canada: Sherpa International, 1988.

Reinhardt, T. A., Horst, R. L. & Goff, J. P. (1988). Calcium, phosphorus, and magnesium homeostasis in ruminants. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 4(2): 331-350, 1988. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0749-0720\(15\)31052-5](https://doi.org/10.1016/S0749-0720(15)31052-5)

Rodríguez-Moreno, O. G., Nahed-Toral, J., Guevara-Hernández, F., Alayón-Gamboa, J. A. & Grande-Cano, J. D. Historia y caracterización técnica y socioeconómica de la ganadería bovina en la costa de Chiapas, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(55): 1-13. <https://www.researchgate.net/publication/342376836>, 2020.

Russell, J. B., O'Connor, J. D., Fox, D. G., Van Soest, P. J. & Sniffen, C. J. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. *Journal of Animal Science*, 70(11): 3551–3561, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2527/1992.70113551x>

Safdar, H., Amin, A., Shafiq, Y., Ali, A., Yasin, R., Shoukat, A., et al. A review: Impact of salinity on plant growth. *Nature and Science*, 17(1), 34-40, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.7537/marsnsj170119.06>

Santander, C., Sanhueza, M., Olave, J., Borie, F., Valentine, A. & Cornejo, P. Arbuscular Mycorrhizal Colonization Promotes the Tolerance to Salt Stress in Lettuce Plants through an Efficient Modification of Ionic Balance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19: 321–331, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00032-z>

Schwartz, C. I., Bianchi, R. M., Vielmo, A., Piva, M. M., Hentz, G. A., Pavarini, S. P., et al. Nutritional chondrodysplasia in cattle in Brazil. *Tropical Animal Health and Production*, 55: 26, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03438-7>

Sniffen, C. J., O'Connor, J. D., Van Soest, P. J., Fox, D. G. & Russell, J. B. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, 70(11): 3562–3577, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2527/1992.70113562x>

Suttle, N. F. *Mineral Nutrition of Livestock*. (4th ed.). Oxfordshire, United Kingdom: CABI. http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Produccion_Animal/Minerals_in_Animal_Nutrition.pdf, 2010.

Trejo-Arista, L. K. *Comportamiento productivo de ovinos en un sistema silvopastoril de Leucaena leucocephala asociado a Megathyrsus maximus var. Mombasa versus agostadero*. Tesis presentada en opción al grado científico de Maestro en Ciencias en Innovación Ganadera. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo, 2016.

Van Soest, P. J., Robertson, J. B. & Lewis, B. A. Symposium: carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 74(10): 3583-3597. <http://webpages.icav.up.pt/ptdc/CVT/098487/2008/Van%20Soest,%201991.pdf>, 1991.

Vásquez, H. V., Valqui, L., Alegre, J. C., Gómez, C. & Maicelo, J. L. Análisis de cuatro sistemas silvopastoriles en Perú: Caracterización física y nutricional de pasturas, composición florística, reserva de carbono y CO₂. *Scientia Agropecuaria*, 11(2): 167-176, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.03>

Velázquez-Martínez, M., López-Ortiz, S., Hernández-Mendo, O. & Gallegos, S. J. Caracterización químico-nutricional de diferentes especies nativas de un sitio pastoreado por terneras en el norte de Veracruz. *Abanico veterinario*, 1(1): 24-29. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7399598>, 2011.

Viruel, E., Fontana, C. A., Bassi, D., Puglisi, E., Radrizzani, A. B., Martinez, C. L., et al. Silvopastoral systems in dry Chaco, Argentina: Impact on soil chemical parameters and bacterial communities. *Soil use and management*, 37(4): 866-878, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/sum.12653>

Vite, C. C., Martínez, H. P. A., Cortés, D. E., Pérez, H. P., Palma, G. J. M., Escalante, E. J. A. S., et al. Modelos cuantitativos desarrollados con estrategias no destructivas para la estimación del área foliar en *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 24(2): 51-66. <https://revistasacademicas.ucol.mx/index.php/agropecuaria/article/view/197/145>, 2020.

Yu, S., West, C. E. & Beynen, A. C. Increasing intakes of iron reduce status, absorption and biliary excretion of copper in rats. *British Journal of Nutrition*, 71(6): 887-895, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1079/BJN19940194>

Zapata-Campos, C. C., García-Martínez, J. E., Salinas, C. J., Ascacio, V. J. A., Medina, M. M. A. & Mellado, M. Chemical composition and nutritional value of leaves and pods of *Leucaena leucocephala*, *Prosopis laevigata* and *Acacia farnesiana* in a xerophilous shrubland. *Emirates*

Journal of Food and Agriculture, 32(10): 723-730, 2020. DOI: <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i10.2148>

Zhang, H., Guan, W., Li, L., Guo, D., Zhang, X., Guan, J. et al. Dietary carbon loaded with nano-ZnO alters the gut microbiota community to mediate bile acid metabolism and potentiate intestinal immune function in fattening beef cattle. *BMC Veterinary Research*, 18: 425, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12917-022-03483-2>