



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE ENSEÑANZA, INVESTIGACIÓN Y
SERVICIO EN ZOOTECNIA

POSGRADO EN PRODUCCIÓN ANIMAL

DIAGNÓSTICO MINERAL DE BOVINOS EN UNA UNIDAD DE
PRODUCCIÓN SILVOPASTORIL EN EL ESTADO DE YUCATÁN

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA

Presenta:

ERICK ALBERTO LÓPEZ ROJAS

Bajo la supervisión de: Alejandro Lara Bueno, Dr.



COORDINACIÓN ACADÉMICA
CENTRO DE SERVICIOS EDUCATIVOS
CENSA DE EDUCACIÓN CONTINUADA



Chapingo, Estado de México. Junio 2018

**DIAGNÓSTICO MINERAL DE BOVINOS EN UNA UNIDAD DE PRODUCCIÓN
SILVOPASTORIL EN EL ESTADO DE YUCATÁN**

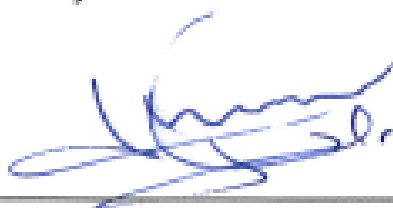
Tesis realizada por **ERICK ALBERTO LÓPEZ ROJAS** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INNOVACIÓN GANADERA



DIRECTOR:

Dr. Alejandro Lara Bueno



ASESOR:

Ph.D. Maximino Huerta Bravo



ASESOR:

Dra. Citlalli Celeste Gonzáles Ariceaga

Contenido

LISTA DE CUADROS	v
DEDICATORIAS.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	7
DATOS BIOGRÁFICOS.....	8
1 INTRODUCCIÓN GENERAL	9
2 REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1 Sistemas silvopastoriles	10
2.2 Ventajas del uso de los sistemas silvopastoriles.....	10
2.3 Especies empleadas en el estudio.....	11
2.3.1 <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.....	11
2.3.2 <i>Gymnopodium antigonoides</i> (Robinson) Blake	12
2.3.3 <i>Phitecellobium albicans</i> (Kunth) Benth	12
2.3.4 <i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg	13
2.3.5 <i>Leucaena collinsii</i> (Britton & Rose) Zarate	13
2.3.6 <i>Cynodon nlemfuensis</i> Vandyerst	13
2.3.7 <i>Brachiaria hibrida</i>	14
2.3.8 <i>Brachiaria brizantha</i> (Hochst. Ex A. Richa.) Stapf.....	15
2.4 Importancia de los minerales en la nutrición animal.....	15
2.5 Diagnóstico mineral	16
2.6 Clasificación y principales funciones de los minerales	17
2.7 Requerimientos y desbalances de minerales.....	19
2.8 Componentes del diagnóstico mineral	21
2.8.1 Perfil mineral en suelo	22
2.8.2 Perfil mineral en agua.....	23
2.8.3 Perfil mineral en forraje	23
2.8.4 Perfil mineral en suero sanguíneo	24
2.9 Literatura citada.....	25
3 DIAGNÓSTICO MINERAL DE BOVINOS EN UNA UNIDAD DE PRODUCCIÓN SILVOPASTORIL EN EL ESTADO DE YUCATÁN.....	30
3.1 Resumen	30
3.2 Abstract	31
3.3 INTRODUCCIÓN.....	32

3.4	Materiales y métodos.....	32
3.4.1	Área de estudio	32
3.4.2	Colecta y procesamiento de las muestras	33
3.4.3	Análisis de laboratorio	35
	Minerales.....	35
3.4.6	Análisis estadístico	37
3.5	Resultados y discusión	37
3.5.1	Concentración mineral en suelo	38
3.5.2	Concentración mineral en agua	39
3.5.3	Concentración mineral en forrajes	40
3.5.4	Concentración mineral en suero sanguíneo.....	46
3.5.5	Calidad del forraje a diferente porcentaje de madurez de las gramíneas	52
3.5.6	Efecto de la familia forrajera en la composición nutricional	54
3.6	Conclusiones	56
3.7	Literatura citada.....	57

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Los minerales y sus funciones en el organismo.	18
Cuadro 2. Niveles mínimos para cubrir requerimientos, rango adecuado y máximos tolerables de minerales en alimentos para ganado bovino.....	19
Cuadro 3. Signos de deficiencia y toxicidad causados por macro minerales en el ganado bovino.	20
Cuadro 4. Criterios para la clasificación del estado de los minerales (mg L^{-1}) en suero de bovinos.	25
Cuadro 5. Concentración de minerales (mg kg^{-1}) y pH en suelo en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	38
Cuadro 6. Concentración de minerales (mg L^{-1}) en agua disponible para el ganado, en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	40
Cuadro 7. Concentración mineral en el forraje de gramíneas con diferentes porcentajes de madurez en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	41
Cuadro 8. Concentración mineral en gramíneas y leguminosas en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	44
Cuadro 9. Concentración mineral (mg L^{-1}) en suero sanguíneo de animales jóvenes y adultos, en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	47
Cuadro 10. Porcentajes de proteína cruda, extracto etéreo, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, cenizas, materia seca, materia orgánica de gramíneas cosechadas a diferentes porcentajes de madurez en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	52
Cuadro 11. Porcentajes de proteína cruda, extracto etéreo, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, cenizas, materia seca, materia orgánica en leguminosas y gramíneas en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.	54

DEDICATORIAS

A mis padres el Ing. José Francisco López Gutiérrez y a la Dra. Mercedes Magdalena Rojas Hernández por sus sabios consejos, por su amor, cariño y su apoyo incondicional, aun en los momentos más difíciles.

A mis hermanos Carlos, Mary y Erika por su apoyo, paciencia y su gran amor, siendo para mi ejemplo de constancia y superación.

A Mi Novia Ilse Larraguivel por su apoyo, comprensión y por demostrarme que la vida está llena de amor y alegrías y que no existen obstáculos para salir adelante.

A Óscar, Ivonne y Arturo Larraguivel por brindarme su apoyo y comprensión en diferentes momentos de mi vida.

Mi mayor agradecimiento para todas y cada una de estas valiosas personas,

Erick Alberto López Rojas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo y en especial al Posgrado en Producción Animal por ser parte vital en mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por contribuir a mi desarrollo profesional.

Al Dr. Alejandro Lara Bueno por su paciencia, dedicación e inmenso apoyo en la realización de esta tesis.

Al PhD Maximino Huerta Bravo por sus sabios consejos y apoyo invaluable e incondicional.

A la Dra. Citlalli Celeste González Ariceaga por su apoyo incondicional, y por las facilidades brindadas en el laboratorio del Posgrado en Producción Animal.

A Eduardo Canal por su amistad y su apoyo extraordinario en el Laboratorio.

A todos mis compañeros de la Maestría en Ciencias en Innovación Ganadera Generación 2016-2017, y sobre todo a Jaime Rosas, Gabriela Hernández, Ricardo Rocha y Juan Pablo por inolvidables momentos durante estos dos años.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Erick Alberto López Rojas
Fecha de nacimiento	02 de junio de 1990
Lugar de Nacimiento	San Cristóbal de las Casas, Chiapas.
CURP	LORE900602HCSPJR05
Profesión	Ingeniero Agrónomo Especialista en Zootecnia
Cédula profesional	9607678

Desarrollo académico

Preparatoria	Preparatoria Agrícola (2006 – 2009) Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	Departamento de Zootecnia (2009 – 2013) Universidad Autónoma Chapingo
Maestría	Posgrado en Producción Animal (2016 – 2017) Universidad Autónoma Chapingo

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción animal en los trópicos se desarrolla principalmente en condiciones de pastoreo, caracterizándose por el bajo valor nutritivo e irregular disponibilidad de los forrajes debido a las altas temperaturas y a la marcada estacionalidad de lluvias. La producción animal en los trópicos puede desarrollarse a partir de diferentes modalidades donde los sistemas silvopastoriles favorecen la incorporación de árboles y arbustos (Alonso, 2011).

Los sistemas silvopastoriles se presentan como una opción para incrementar la productividad ganadera y reducir el impacto negativo al ambiente al implementarse en áreas degradadas por el sobrepastoreo, incorporando árboles o arbustos en interacción con diversos componentes, en un esquema de manejo integral que ayudan a mantener el equilibrio ambiental, para preservar el suelo, mejorar la capacidad de carga y aumentar la productividad (Quevedo, 2014). De este modo, la calidad del forraje ofrecido determinará el rendimiento del animal; donde la medición de proteína, valor energético y minerales establecerán principalmente la capacidad de pastoreo. A pesar de esto, existen pocos estudios enfocados en la determinación de los requerimientos de energía, proteína y minerales en los sistemas silvopastoriles.

Para determinar el requerimiento mineral en un sistema silvopastoril es necesario efectuar un diagnóstico de la situación actual, teniendo en cuenta los análisis químicos del agua, suelo, planta y suero sanguíneo, así como análisis bromatológicos del forraje; además de signos o síntomas clínicos presentes en el animal en función del estado productivo y condición corporal. Con ello, se puede tener una primera idea de la situación en la unidad de producción en particular o en una región ganadera específica, y así determinar el estado mineral de los animales para establecer estrategias de suplementación a fin de cubrir los requerimientos minerales (Arizmendi-Maldonado et al., 2002). Por estos motivos es de interés realizar investigación en la cual se analice el comportamiento de la nutrición mineral en un sistema silvopastoril, con el fin de determinar niveles e interacciones entre los componentes del sistema

(agua, suelo, forraje, animal), así como para aquellos factores que afectan los requerimientos de minerales en los animales.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles son componentes de los sistemas agroforestales bajo un esquema de manejo integral para la producción pecuaria, combinando plantas leñosas perennes con otros componentes del mismo sistema (suelo, plantas forrajeras herbáceas y animales). Los sistemas silvopastoriles desarrollan microclimas que aceleran el reciclaje de nutrientes y el uso óptimo de la energía solar, proporcionando múltiples productos y servicios (Mejía-Díaz, Mahecha-Ledesma, & Angulo-Arizala, 2017).

Solorio-Sánchez, Bacab-Pérez & Ramírez-Avilés (2011) explican que los sistemas silvopastoriles están conformados por: entradas al sistema, un ejemplo es la lluvia, radiación solar, bióxido de carbono y nitrógeno atmosférico; y salidas del sistema, todos los productos generados o cosechados, como carne, leche, lana, madera, leña, frutos y miel. Es decir, los sistemas silvopastoriles se generan a partir de diversas interacciones entre componentes permitiendo incrementar la productividad y el beneficio neto de los sistemas a mediano y largo plazo (Alonso, 2011).

2.2 Ventajas del uso de los sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles incorporan diversos aportes al suelo mejorando la fertilidad a través de varios procesos, incrementando la cantidad de materia orgánica y mejorando el contenido de nutrientes en el suelo (Trejo, 2016). Otros autores señalan que los sistemas silvopastoriles reducen la temperatura de 2 a 4°C por efecto de sombra; disminuyendo la carga calórica y mejorando la productividad animal a mediano y largo plazo en comparación con monocultivos de gramíneas, disminuyendo el impacto ambiental con la captura de carbono y la emisión de metano (Cuartas Cardona, Naranjo Ramírez, Tarazona Morales, Murgueitio Restrepo, Chará Orozco, Ku Vera & Barahona Rosales, 2014).

Otras ventajas de los sistemas silvopastoriles son la formación de microclimas, reducen la erosión del suelo, mayor fijación de nitrógeno, y menores costos de producción (Luccerini, Subovsky & Borodowski, 2013).

2.3 Especies empleadas en el estudio

2.3.1 *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

- Descripción botánica de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

L. leucocephala (leucaena) es una planta leñosa arbórea o arbustiva de 3 a 20 m de alto, copa redondeada, ligeramente abierta y rala (Pedroche, 1994); tallo de corteza gris o blanquecina, lenticelas abundantes, ramas jóvenes cilíndricas, ramas maduras glabras (sin pelos) ásperas y pardo-rojizas. Esta planta se caracteriza por desarrollar hojas alternas, bipinadas, dísticas, con estípulas persistentes de 1.5 a 4.1 mm de largo, ovadas a lanceoladas, apiculadas, cuando secas inconspicuas o contraídas, pecíolos de 1 a 3.7 cm de largo, glabros o densamente blanco-pubescentes con una glándula de 1 a 4 mm de largo, verde grisáceas y glabras. Las flores son de tipo cabezuelas que pueden llegar a tener de 100 hasta 180 flores blancas. Los frutos de la leucaena son vainas oblongas, estipitadas que se encuentran en capítulos florales de 30 o más vainas, las cuales contienen de 15 a 30 semillas aplanadas de color café brillante dispuestas transversalmente en la vaina (Grether, Martínez-Bernal, Luckow & Zárate, 2006).

- Valor nutritivo de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit

La leucaena presenta porcentajes de proteína cruda en follaje de 20 a 32% (Benítez, Bernal, Cortés, Vera & Carrillo, 2010), fibra detergente neutra de 27% y fibra detergente ácido del 19%, materia seca del 60%, energía metabolizable de 2.32 Mcal kg⁻¹ (Gómez, Nahed, Tewolde, Pinto & López, 2006). Dispone de 2.8% de calcio, 0.26% de fósforo, 0.37% de magnesio, 1.78% de potasio, 0.21% de sodio y 0.12% de hierro en sus hojas (Trejo, 2016). Esta especie presenta un 31.7% de proteína cruda, 10% de fibra cruda, 2.11% de lípidos en la semilla, definiéndose como una especie de alto potencial forrajero (Román-Cortés, García-Mateos, Castillo-González, Sahagún-Castellanos & Jiménez-Arellanes, 2014).

2.3.2 *Gymnopodium antigonoides* (Robinson) Blake

- Descripción botánica de *Gymnopodium antigonoides* (Robinson) Blake

Gymnopodium es un arbusto o árbol pequeño de la familia *Polygonaceae*, con tres metros de alto o más, corteza profundamente fisurada, hojas alternas y simples ovadas a elípticas, peciolo corto, base redondeada u obtusa, margen completo, ápice redondo u obtuso, con pubescencia en el envés y cuenta con flores paniculadas, racemosas trímeras y hermafroditas, de color verdoso. El patrón de ramificación es simpodial monocasio de orientación combinada y siléptico; presenta una gran cantidad de inflorescencias tipo panículas racemosas que se desarrollan en la periférica de la copa en la parte terminal y axilar de las ramas, en forma acrópeta y se estructuran en filotaxis helicoidal (Interián Ku, García Moya, Hernández, Ignaciaseso, Romero Manzanares, De la Rosa & Vaquera Huerta, 2009).

- Valor nutritivo de *Gymnopodium antigonoides* (Robinson) Blake

En *Gymnopodium* el contenido de proteína cruda se reporta de 9.8%, cenizas de 5.7%, fibra detergente neutra de 56%, fibra detergente ácido de 43%, materia seca de 55%, fenoles 2.5%, y taninos con 4.5% (Ayala-Burgos, Capetillo, Cetina, Zapata, & Sandoval, 2006).

2.3.3 *Phitecellobium albicans* (Kunth) Benth

- Descripción botánica de *Phitecellobium albicans* (Kunth) Benth

Chimay es un árbol que crece hasta 20 m de altura, ramas espinosas, copa aplanada, espinas de los troncos erguidas y comprimidas alcanzando hasta los 5 cm de largo; hojas alternas compuestas de 20 a 30 pares de pinnas y frutos con vainas oblongas de 7 cm de largo (Ayala-Burgos et al., 2006).

- Valor nutritivo de *Phitecellobium albicans* (Kunth) Benth

El contenido de proteína cruda del Chimay es de 16.2%, cenizas de 4.1%, fibra detergente neutra de 43%, fibra detergente ácido de 30%, materia seca de 64.9%, fenoles de 2.2%, y taninos con 6.2% (Ayala-Burgos et al., 2006)

2.3.4 *Piscidia piscipula* (L.) Sarg

- Descripción botánica de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg

Piscidia piscipula es una arbórea que alcanzan 20 m de altura, con tallos seríceos, glabrescentes, folíolos ovados o elípticos de 4 a 17 cm de largo y 2.11 cm de ancho, ápice obtuso o agudo; la inflorescencia es en racimos axilares, flores de 12 a 15 mm de largo, pétalos blancos con marcas rosadas o rojizas, frutos de 4 a 10 cm de largo y 3 a 4.5 cm de ancho, semillas café-rojizas a café oscuras de 3 a 8 mm de largo y 2.5 a 3.5 mm de ancho (Sosa Rubio, Pérez Rodríguez, Ortega Reyes & Zapata Buenfil, 2004).

- Valor nutritivo de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg

Para el caso de hojas y tallos de *Piscidia piscipula*, Ayala-Burgos et al. (2006) encontraron de 10 a 15.8% de proteína, cenizas de 9.8%, fibra detergente neutra de 43.6 a 67.4%, fibra detergente ácido de 28.2 a 37.4%, materia seca de 59.7 a 66.9%, fenoles de 0.8 a 1.7% y taninos de 0.3 a 10.7%.

2.3.5 *Leucaena collinsii* (Britton & Rose) Zarate

- Descripción botánica de *Leucaena collinsii* (Britton & Rose) Zarate

L. collinsii es un árbol o arbusto de hasta 5 metros de alto, tronco grueso de color gris claro, hojas grandes, flores blancas y redondeadas con frutos de color rojo (Pinto, Medina, Gómez, Guevara & Ley, 2014).

- Valor nutritivo de *Leucaena collinsii* (Britton & Rose) Zarate

Pinto et al. (2014) determinaron la composición nutrimental del guaje rojo y reportaron contenidos de proteína de 17 a 20%, fibra cruda de 38 a 49, fibra detergente neutro de 20 a 37%, fibra detergente ácido de 30 a 33% y materia seca de 53 a 58%.

2.3.6 *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst

- Descripción botánica de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst

C. nlemfuensis es una gramínea perenne estolonífero que no presenta rizomas, hojas planas o arqueadas de 5 a 16 cm de largo y 2.5 mm de ancho, contiene de 4 a 9 racimos de 4 a 10 cm de largo formando un verticilo (ocasionalmente dos) en la punta

del tallo, colores verde pálido o rojizo, glumas angosta y lanceolada en el prófalo, la hoja superior mide la mitad o tres cuartos de la longitud de la espiguilla. El pasto estrella tiene tallos delgados, sin pelos, erectos o recostados sobre el suelo (formando estolones de 2 a 3 mm de ancho) y con las puntas ascendentes de 30 a 60 cm. Las espigas están compuestas de numerosas espiguillas de 2 a 3 mm dispuestas en 2 hileras sobre un mismo lado del eje de la espiga, con o sin aristas; con flores muy pequeñas cubiertas por una serie de brácteas con glumas de 1.8 a 2.3 mm de largo y sub-iguales (Bogdan, 1997).

- Valor nutritivo de *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst

Villalobos & Arce (2013) reportaron 8.12% de proteína cruda, 75.91% de fibra detergente neutro, 44.23% de fibra detergente ácido y 0.91 a 2.33% extracto etéreo. Vivas-May, Rosado Rubio, Castellanos Ruelas, Heredia y Aguilar, & Cabrera Torres, (2011) reportaron 30.4% a 31.5% de fibra cruda, 5.7 a 11% cenizas de en condiciones normales de precipitación y 9% en época seca (Combatt, Jarma & Maza, 2008).

2.3.7 *Brachiaria* híbrida

- Descripción botánica

Proveniente de la cruce No. 625 (*Brachiaria ruziziensis* clon 44-6 x *Brachiaria brizantha* CIAT 6297), realizado en 1988 por el programa de pastos del CIAT (Suárez-Intriago, 2013). Gramínea perenne de crecimiento inicial amacollado alcanzando hasta un metro de altura, tallos cilíndricos con hábito semi-decumbente capaz de enraizar a partir de los nudos cuando entran en contacto con el suelo (Argel et al., 2007). Hojas lanceoladas pubescentes alcanzando hasta 40 cm de longitud y 2.5 a 3.5 cm de ancho; inflorescencia panícula de 30 a 40 cm de longitud de 3 a 8 racimos con hilera de doble espiguillas con una variación de 2.4 a 6 mm de largo (García, David & Meléndez Nava, 2003).

- Valor nutritivo

Argel et al. (2007) indican porcentajes de proteína cruda de 12 a 21.6%; Cuadrado, Torregroza & Garcés (2005) reportan porcentajes de proteína cruda (PC) promedio de 8.3 y 9.8 %; mientras que el contenido de fibra detergente neutro muestra rangos de

49.4 a 52.2%, fibra detergente ácido (FDA) con valores de 29.6 a 23.8% y materia seca con 16 a 19% (Argel et al., 2007). En relación a minerales se han reportado para el caso de Mulato valores de calcio de 0.25 a 0.46%, fósforo de 0.18% a 0.36%, magnesio de 0.24 a 0.65%, potasio de 1.05 a 3.11%, cobre 15 mg kg⁻¹ y zinc 30 mg kg⁻¹ (Cuadrado et al., 2005).

2.3.8 *Brachiaria brizantha* (Hochst. Ex A. Richa.) Stapf

- Descripción botánica

Gramínea perenne, semi-erecta a erecta, forma macollos y produce raíces en los entrenudos, hojas lanceoladas con poca o nula pubescencia, la inflorescencia es una panícula racimosa variando de 34 a 87 cm de longitud, con el eje principal estriado, glabro o piloso, con 1 a 17 racimos solitarios, unilaterales y rectos, de 8 a 22 cm de longitud (Argel et al., 2007).

- Valor nutritivo

Euclides, Cardoso, Macedo & Oliveira (2000) y Tsuzukibashi, Costa, Moro, Ruggieri & Malheiros (2016) reportan 8.2 a 18.72% de PC, 73.1% FDN, 26 a 32% FDA. Perego (1999) señala contenidos de 16.9% de PC, 16.7% de FC, 2.1% de extracto etéreo y 5 a 7% de cenizas.

2.4 Importancia de los minerales en la nutrición animal

Los minerales son sustancias inorgánicas presentes en todo el cuerpo, requeridos en pequeñas cantidades (1 a 2500 mg/día) para la formación de tejidos, estructuras o fluidos en diversas combinaciones funcionales y químicas, necesarios para la salud, crecimiento, producción, reproducción e inmunológicas dependiendo de la especie animal (Soetan, Olaiya & Oyewole, 2010). McDonald, Edwards, Greenhalgh & Morgan (2006) señalan que los minerales igualmente actúan como reguladores en la replicación celular y diferenciación en procesos endócrinos, catalíticos y metaloenzimáticos, manteniendo la permeabilidad de la membrana y transmisores de impulsos nerviosos. Cada uno de estos minerales realiza diversas funciones esenciales de acuerdo a la forma o combinación química del mineral y su entorno en los tejidos y fluidos orgánicos (Arteaga, 2014).

Por lo tanto, los macro minerales (calcio, fósforo, magnesio, potasio, sodio, cloro y azufre) son requeridos en cantidades superiores a 10 mg kg^{-1} , mientras que los micro-minerales o minerales traza (hierro, cobre, cobalto, potasio, magnesio, yodo, zinc, manganeso, molibdeno, flúor, cromo, selenio y azufre) son requeridos en cantidades menores a 10 mg kg^{-1} por parte del animal. Las deficiencias o excesos de los macro y micro minerales ocasionan diversas alteraciones en el animal, expresándose en menor potencial de producción e inmunidad, con y diversos signos clínicos (Simsek & Aykut, 2007; Eruvbetine, 2003).

2.5 Diagnóstico mineral

Gupta & Gupta (2014) señalan que, de no realizarse análisis de vitaminas y minerales de los alimentos en forma rutinaria, los consumos de estos nutrimentos deben ser calculados cuantitativamente a partir de valores bibliográficos. Por lo tanto, para determinar si existen deficiencias o excesos de minerales en el animal es necesario realizar un diagnóstico mineral. El diagnóstico mineral se rige por un orden cronológico de fases (anamnesis, exploración física, diagnóstico diferencial, pruebas paraclínicas y de laboratorio, diagnóstico final y plan terapéutico), donde cada una de estas fases se deben completar antes de iniciar la siguiente fase (Blood, 2000).

Huerta (1999) indica que el diagnóstico del estado mineral comprende de varios factores: signos clínicos, estudios químicos de sangre, determinación mineral de las fuentes del alimento que el animal consume, incluyendo el agua, y otros componentes como el suelo. El suero sanguíneo y otros tejidos determinan la concentración total de minerales, siendo un medio popular y potencialmente valioso para evaluar el estado nutricional de los micro minerales, evaluando su prevalencia y reservas disponibles en el animal (Kincaid, 2000).

Las pruebas de pastos y suelos son herramientas necesarias para el diagnóstico mineral capaces de identificar diversas incidencias minerales. Las ventajas de estas pruebas son: la facilidad y menor costo para realizarlas cuando se compara con la toma de muestras, análisis sanguíneos o tejidos animales (Khan, Ashraf & Hussain, 2007). Los análisis de la dieta proporcionan datos útiles para realizar análisis químicos reales y se debe incluir la determinación de aquellos elementos con interacciones

importantes, por lo que, no se debe confiar en los valores tabulares y etiquetas de alimentación para estimar el consumo de minerales traza. Otra información útil sobre la dieta incluye: el tipo de forraje, el método de procesamiento, la relación forraje: concentrado, la adición de tampones o sales aniónicas, el nivel de proteína y la solubilidad de ésta (Kincaid, 2000).

2.6 Clasificación y principales funciones de los minerales

Un elemento mineral se considera esencial para el organismo cuando uno de estos es requerido en funciones bioquímicas específicas, necesarios para una mejora en la salud (NRC, 2005). McDowell & Arthington (2005) indican que los elementos minerales son esenciales por tener un papel metabólico específico dentro del organismo, influyendo en la mejora de la producción, reproducción y la salud. O'Dell & Sunde (1997) señalan que los minerales son elementos que intervienen en diferentes procesos bioquímicos para la mejora de la producción, reproducción, crecimiento y salud a lo largo del ciclo de vida del animal, aunado a que los demás nutrimentos están en cantidades óptimas, incluyendo a otros minerales. Con base en lo anterior, los minerales deben estar presentes en los alimentos para un buen desarrollo y funcionamiento metabólico.

McDonald et al (2006) identifican 22 elementos minerales esenciales, de los cuales en alguno de estos no se ha comprobado su esencialidad. Por lo tanto, el ganado bovino necesita minerales para mantenerse productivo y saludable, necesitando algunos minerales en mayores cantidades que otros. En el Cuadro 1 se muestra algunos minerales esenciales, sus funciones y las fuentes de donde las obtiene el ganado bovino.

Cuadro 1. Los minerales y sus funciones en el organismo.

Mineral	Macros minerales: necesarios en cantidades mayores	Fuente
Calcio	Formación de huesos y dientes, función muscular y nerviosa, contracción muscular, coagulación sanguínea, permeabilidad celular, producción de leche.	CaHPO ₄ -H ₂ O Forrajes y leguminosas
Fósforo	Formación de huesos y dientes, fosforilación, compuestos de fosfato de alta energía y componente de ARN y ADN, y muchos sistemas enzimáticos.	CaHPO ₄ -H ₂ O, NaH ₂ PO ₄ Granos
Magnesio	Desarrollo normal de esqueleto, crecimiento, reproducción y funciones enzimáticas, desarrollo de huesos, contracción muscular, activador enzimático primordialmente en el sistema glicolítico, participa en la fosforilación oxidativa y ayuda a disminuir la irritabilidad de los tejidos.	Óxido, sulfato y carbonato de magnesio
Sodio	Involucrado en la regulación de la presión osmótica y el balance ácido-base, transmisión del impulso nervioso, permeabilidad celular y preservación de la irritabilidad normal de la célula muscular.	NaCl
Cloro	Principal anión involucrado en la presión osmótica y el balance ácido-base. Anión principal de los jugos gástricos como parte del ácido clorhídrico.	NaCl
Potasio	Funciones metabólicas, regulación de la presión osmótica y el balance ácido-base, contracción muscular cardíaca, fosforilación de la creatina. Influye en el metabolismo de los carbohidratos favoreciendo la entrada de glucosa a las células.	Cloruro y Sulfato de K, Forrajes
Azufre	Funciones metabólicas, formación de amonio, ácidos en el rumen, forma parte de aminoácidos con S, constituyente del sulfato de condroitina, tiamina y biotina, indispensable en la síntesis de proteína.	Sulfatos, forrajes
Mineral	Microminerales: necesarios en cantidades menores	Fuente
Cromo	Respuesta inmune y factor de tolerancia a la glucosa	Granos y cereales
Cobalto	Componente de la vitamina B ₁₂ , de la adenosilcobalamina y metilcobalamina	CO ₃ , SO ₄ , y Cl de Co
Cobre	Cofactor de varios sistemas enzimáticos de reducción-oxidación, síntesis de la hemoglobina, formación ósea y metabolismo tisular, pigmentación del pelo.	Sulfato, cloruro carbonato, óxido y nitrato cúprico
Iodo	Producción de la hormona tiroidea y participa en el metabolismo de la energía.	NaCl iodizada
Manganeso	Formación ósea, activador y constituyente de sistemas enzimáticos	Sulfato y óxido de Mn
Selenio	Componente de la glutatión peroxidasa, funciona como antioxidante.	Selenato y selenito de Na
Zinc	Cofactor de varios sistemas enzimáticos, en peptidasas y anhidrasa carbónica; necesario para la formación de huesos y para la síntesis y metabolismo de las proteínas.	Carbonato, cloruro, sulfato y óxido de Zn

Adaptado de McDowell & Arthington (2005)

Las funcionalidades de los minerales en diversas concentraciones orgánicas están sujetas a un sin número de interacciones afectando la relación entre estos, por lo tanto, dichas interacciones determinarán que los minerales sean disponibles o funcionales en el organismo (McDonald et al., 2006; Suttle, 2010).

2.7 Requerimientos y desbalances de minerales

Las necesidades básicas y el mantenimiento corporal requieren de los nutrientes necesarios para mantener intactos los tejidos, la digestión, circulación, respiración y otros procesos vitales internos y externos que le permitan al animal diversos movimientos (Underwood & Suttle, 2003). Por lo tanto, el organismo tiene la capacidad de reconocer un nutriente mineral y lidiar con la dicotomía entre su esencialidad y su toxicidad regulando la absorción y excreción de estos nutrientes esenciales como una forma de regular el mantenimiento de niveles compatibles con la vida, mientras que al mismo tiempo se minimiza la probabilidad de que estos elementos minerales participen en reacciones tóxicas (De la Guardia & Garrigues, 2015).

Los efectos fisiológicos de los elementos esenciales van a depender de los niveles que ingiera el animal, basado en un rango de consumo (rango seguro y adecuado), proporcionando una función óptima. Los niveles progresivamente inferiores o superiores a este rango presentan signos de deficiencia o toxicidad cuando la ingesta supera el rango seguro y adecuado (O'Dell y Sunde, 1997). Así mismo, el valor recomendado representa la ración dietética o la ingesta adecuada, mientras que el nivel máximo de consumo tolerable representa el límite por encima del cual está presente el riesgo de toxicidad (De la Guardia & Garrigues, 2015). En el Cuadro 2 se presenta la información acerca de los niveles mínimos para cubrir requerimientos del ganado bovino de acuerdo con McDowell & Arthington (2005), rango adecuado del consumo mineral con información de NRC (2001) y Puls (1988) y niveles máximos tolerables (NRC, 2005), de algunos minerales esenciales en el alimento para el ganado bovino.

Cuadro 2. Niveles mínimos para cubrir requerimientos, rango adecuado y máximos tolerables de minerales en alimentos para ganado bovino.

Bovino	Minerales									Relación Ca: P
	Ca	P	Mg	Na	K	Cu	Fe	Zn	Mn	
	-----%-----					-----mg Kg ⁻¹ -----				
^z NM	0.3	0.25	0.20	0.06	0.8	10	30	30	40	2.0 : 1.0
^y RA	0.3-	0.25-	0.25-	0.18-	0.6-	10-	30-	100-	40-	1.2 : 2.0
	0.81	0.45	0.35	0.67	2.0	18	300	500	200	
^x NMT	1.5	0.7	0.6	1.2-	2.0	40	500	500	2000	3.3 : 1.0
				1.8						

^z Nivel mínimo para cubrir requerimientos del ganado bovino (McDowell & Arthington, 2005)

^y Rango adecuado, según NRC (2000) y Puls (1998),

^x Niveles máximos tolerables de minerales en el alimento (NRC, 2005)

La presencia de desbalances minerales no siempre es fácil de apreciar, pueden asociarse de manera aguda con cambios anatómicos y fisiológicos fácilmente perceptibles o, asociarse a cuadros subclínicos de difícil diagnóstico (Cuadro 3 y 4) que se confunden entre los propios desbalances minerales o bien con otro tipo de desbalances nutricionales y enfermedades (McDowell & Arthington 2005).

Cuadro 3. Signos de deficiencia y toxicidad causados por macro minerales en el ganado bovino.

Elemento ^z	Signos clínicos	
	Deficiencia	Toxicidad
Calcio (0.30%)	Debilidad ósea, crecimiento retrasado, producción baja de leche y tetania.	Anormalidades óseas, reducción del consumo de alimento y ganancia de peso.
Fósforo (0.25%)	Huesos frágiles, debilidad general, pérdida de peso, delgadez excesiva, producción de leche y reproducción reducida, pica.	Similar a los signos causados por el exceso de calcio
Magnesio (20%)	Tetania e irritabilidad, convulsiones.	Debilidad, alteración de la locomoción, diarrea, somnolencia, muerte.
Sodio (0.06%)	Gran apetito al suministrar sal, laminado ansioso de madera, suelo y sudor de otros animales, y consumo de agua mayor a lo normal.	Reducción del consumo de alimento y agua, problemas digestivos, diarrea y baja ganancia de peso.
Potasio (0.08%)	Signos no específicos: disminución del consumo y la eficiencia de utilización de alimento y agua; reducción del crecimiento, debilidad muscular, trastornos nerviosos, rigidez y delgadez excesiva.	Difícil de alcanzar niveles tóxicos. Antagoniza con el magnesio, sodio y calcio.
Azufre (0.20%)	Pérdida de peso, debilidad, lagrimeo, reducción de la producción de leche y muerte; acumulación de ácido láctico en el rumen, sangre y orina.	Polioencefalomalacia, dolor abdominal, intoxicación por sulfuros, congestión pulmonar, deshidratación y enteritis severas.
Signos de deficiencia y toxicidad causados por microminerales en el ganado bovino.		

Selenio (0.1mg kg ⁻¹)	Distrofia muscular, baja tasa de reproducción, rigidez y muerte súbita.	Somnolencia, emaciación, pelo áspero, crecimiento alargado de pezuñas, cojera y parálisis.
Cobre (10mg kg ⁻¹)	Anemia, diarrea profusa, crecimiento lento, decoloración del pelo, ataxia en recién nacidos, infertilidad temporal, fibrosis miocárdica y huesos frágiles.	Anemia, distrofia muscular, bajo crecimiento y deterioro reproductivo. Vómito, salivación, dolor abdominal, convulsiones, parálisis, colapso y muerte.
Zinc (30 mg kg ⁻¹)	Reducción en el consumo de alimento y tasa de crecimiento, piel seca, escamosa con grietas y difícil cicatrización, pérdida y aspereza de pelo, crecimiento testicular reducido.	Difícil de observar eventos.
Hierro (30 mg kg ⁻¹)	Difícil observar deficiencia, anemia, baja ganancia de peso, letargo, fatiga aún con poco movimiento.	Reducción del consumo de alimento y ganancia de peso, diarrea, hipotermia y acidosis metabólica.
Manganeso (40 mg kg ⁻¹)	Anormalidades óseas, fertilidad reducida, abortos y deformaciones fetales; patas deformadas en becerros.	Difícil observar eventos, tasa reproductiva baja.
Cobalto (0.2 mg kg ⁻¹)	Signos no específicos; pérdida paulatina del apetito, emaciación, mucosas pálidas, crecimiento retardado, pelaje áspero y reducción en la producción de leche.	Disminución del apetito y peso, anemia.
Yodo (0.5 mg kg ⁻¹)	Bocio, ceguera en neonatos, mortinatos, anestro, retención placentaria, semen anormal.	Depresión del apetito, apatía, piel escamosa, tos seca y lagrimeo excesivo.

(McDowell & Arthington, 2005).

2.8 Componentes del diagnóstico mineral

El control cuantitativo de elementos minerales en los animales depende directamente de sus concentraciones en las diversas fuentes como: suelo, agua y forrajes (Khan et al., 2007). Sin lugar a duda, el análisis del forraje es mejor indicador potencial del estado mineral en rumiantes comparado con el suelo. Del mismo modo, las concentraciones de minerales en los tejidos o en los fluidos de animales reflejan mejor la disponibilidad de minerales que los análisis del forraje (McDowell, 1985). Además, la sangre se considera como el bio-sustrato más importante para la estimación del estado mineral de un animal (Khan et al., 2007).

El diagnóstico mineral puede estar conformado por varios componentes que se consideren aportadores de minerales al ganado. Sin embargo, su realización exige alto costo monetario y logístico, por lo que se deben seleccionar y analizar un número mínimo de muestras, que sean representativas e indicativas del estado nutricional del ganado y su relación con factores directamente involucrados en la nutrición mineral.

2.8.1 Perfil mineral en suelo

La cantidad de microelementos en suelos cultivables varía en función de las concentraciones minerales disponibles en la planta y los microminerales que se acumulan en el suelo, presentando deficiencias o toxicidades debido a la lixiviación o el reciclado de nutrientes. McDowell y Arthington (2005) señalan que el origen y las características del suelo influyen directamente en las deficiencias minerales en plantas y animales. Sin embargo, las concentraciones de minerales disponibles para las plantas pueden incrementarse mediante la aplicación de fertilizantes y el tipo de cultivo, o diversos elementos que se incorporan a partir de la contaminación atmosférica, aportes naturales o por aguas de escorrentía (Wild & Jones, 1992); y en animales, a través de la suplementación mineral.

El pH y la materia orgánica del suelo son otro factor importante que modifica la disposición de los elementos en el suelo; un suelo neutro es cuando el pH es igual a 7, es ácido cuando el pH es inferior a 7 y es básico cuando el valor es superior a 7. Generalmente, un pH entre 6 y 7.5 permite el mejor desarrollo de las plantas; valores altos del pH hacen que el Cu, Mn, Zn, y Fe sean menos aprovechables, aunque en Mo se tienen efectos contrarios. Hoefft, Aldrich, Nafziger & Johnson (2000) señalan que en suelos con pH bajos la disponibilidad y la absorción de elementos como Fe, Mn, Cu y Zn para el forraje aumentan o disminuyen según sea el caso; mientras que, ante un incremento del pH la disponibilidad de Ca, Mg, K, P y N aumentan. La ingesta de suelo, principalmente por rumiantes de forma indirecta, es influenciada por diversos factores como son: sobrepastoreo, escasez de forraje, bajo crecimiento del pasto o suelo impregnado al forraje (Suttle, 2010).

Smith, Adebawale, Ogundola, Taiwo, Akpavie, Larbi & Jabbar (2000) indican que la privación o escasez de forraje por largos periodos de tiempo obliga al animal a

satisfacer sus requerimientos de consumo ocasionando geofagia, llevando esto a diversos desbalances minerales en el animal.

2.8.2 Perfil mineral en agua

En la nutrición animal el agua actúa como el elemento más importante para todas las formas de vida, debido a sus características organolépticas y fisicoquímicas, participando en diversas reacciones químicas, como regulador de la temperatura corporal, moderador en el transporte de glucosa, aminoácidos, minerales y vitaminas (Beede, 2012). Las necesidades de agua de los rumiantes se proporcionan a partir de diversas fuentes; agua de bebida, agua presente en los alimentos y agua metabólica que se forma a partir de la oxidación de los nutrientes y los tejidos del cuerpo (Olkowski, 2009).

Diversos autores indican que los minerales presentes en el agua son difíciles de cuantificar, por lo tanto, se deben realizar análisis para conocer su calidad y sus posibles contaminantes que puedan afectar significativamente los niveles o las fuentes minerales para una nutrición mineral adecuada; aunque los minerales contenidos en el agua de bebida son, en muchos casos, insuficientes para satisfacer los requerimientos del animal (Suttle, 2010). De acuerdo con NRC (2001) y Beede (2012) los principales contaminantes del agua son los sulfatos, cloruro de sodio, nitratos y hierro. Suttle (2010) da a conocer que, cuando las concentraciones de azufre son de 600 mg L⁻¹ o más conllevan a deficiencias de cobre. Por lo tanto, la calidad del agua varía de acuerdo a los elementos minerales presentes en ella, siendo necesario conocer su calidad y potenciales contaminantes al momento de balancear raciones minerales.

2.8.3 Perfil mineral en forraje

El contenido mineral y el consumo de forrajes representan limitantes muy importantes en los sistemas de producción de rumiantes. El tipo de suelo, las inapropiadas prácticas de fertilización y la utilización de suplementos minerales de baja calidad, determinan en muchas explotaciones ganaderas, deficiencias o desbalances de minerales en la cadena suelo-planta-animal (Vivas-May et al., 2011). Factores como el bajo nivel de proteína (menor a 7%), el alto nivel de lignina en la dieta y la

contaminación con suelo, reducen el consumo de forrajes y la cantidad de minerales consumidos por el animal (McDowell, Velásquez & Valle, 1997). Las concentraciones de minerales en forrajes van a depender en gran medida del genotipo de la planta, ambiente del suelo, clima y la etapa de madurez, afectando de distinta manera a gramíneas y leguminosas, debido a que ambas tienen diferente habilidad para absorber y almacenar minerales (Suttle, 2010).

Por lo tanto, a mayor contenido de minerales en los forrajes, mayores beneficios para el organismo del animal, siempre y cuando la cantidad absorbida de minerales y sus interacciones no sean antagónicas o sinérgicas con otros compuestos (Georgievskii, Annenkov, & Samokhin, 1982). Considerando lo anterior, el análisis del contenido mineral en los forrajes es necesario para diagnosticar el perfil nutrimental de la dieta diaria y evitar desbalances minerales en animales en pastoreo.

2.8.4 Perfil mineral en suero sanguíneo

Las muestras de sangre se analizan con el objetivo de determinar el estado mineral en rumiantes. Por lo tanto, el muestreo de minerales en sangre es otra medida deseable debido a la dificultad para evaluar el estado mineral a partir solo de las evaluaciones en la dieta. Esta dificultad surge por ser poco práctico o impreciso determinar la composición química de la dieta o las cantidades de alimento consumido, como sucede en pastoreo u otros sistemas difíciles de medir el aporte de minerales a través del consumo de materia seca. Las concentraciones de minerales en sangre se utilizan con frecuencia para evaluar el estado mineral del animal debido a que se correlacionan significativamente con el estado nutricional de algunos elementos traza, y a la facilidad relativa para obtener muestras de sangre (Kincaid, 2000).

Las concentraciones de macro y micro minerales en suero reflejan los mecanismos homeostáticos relacionados con el estado nutricional y la regulación hormonal en el animal, por lo que es común realizar evaluaciones del estado mineral de los animales a través del análisis de suero sanguíneo (NRC, 1980). Otras formas de conocer el estado mineral de los animales son mediante el análisis de tejidos corporales, fluidos, orina, saliva, leche, heces y pelo, incluso de hígado y huesos, con un mínimo de tiempo y poco riesgo para el animal (Khan et al., 2007).

El suero sanguíneo se elige generalmente para el análisis de minerales, evitando el costo y las posibles complicaciones analíticas ante la adición de anticoagulantes, siendo más estable para el transporte y el análisis de Cu, I, Fe, Zn, Mn, Ca, Mg y P (Suttle, 2010). Por lo tanto, cuando se observan deficiencias o cuando las cantidades de minerales son adecuadas en la dieta, se debe investigar los efectos antagónicos de todos los componentes, reflejándose como deficiencias o excesos en el suero sanguíneo.

Khan et al. (2007) señala que los requerimientos, así como los límites de deficiencia y toxicidad de los minerales, están influenciados por diferentes factores como: edad, sexo, nivel de producción, nivel de actividad, especie y línea genética del animal. En el Cuadro 4 se presentan los requerimientos aproximados y los niveles tóxicos de minerales sugeridos para ganado de carne.

Cuadro 4. Criterios para la clasificación del estado de los minerales (mg L⁻¹) en suero de bovinos.

Mineral	Deficiente ^a	Adecuada ^a	Alta ^a
Calcio	<60	80 a 110	120 a 300
Fósforo	<45 ^x <50 ^y	40 a 60 60 a 90	80 a 200 80 a 120
Magnesio	<10 a 11	17 a 30	40 a 65
Sodio	<2300 a 2852	3105 a 3450	3450 a 5750
Potasio	<98	160 a 200	234 a 390 ^b
Cobre	<0.2 a 0.5	0.8 a 1.5	>2.5 ^c
Hierro	<0.15 a 1.3	1.3 a 2.5	4 a 6
Zinc	<0.2 a 0.4	0.8 a 1.4	2 a 5

^xAnimales adultos; ^yAnimales jóvenes

^aPuls (1988); ^bSuttle (2010); ^cHuerta, 1999

2.9 Literatura citada

- Alonso, J. (2011). Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 45 (2), 107-115.
- Alonso, J., Febles, G., Ruíz, T. E., & Achang, G. (2008). Características bromatológicas de guinea (*Panicum maximum* vc. Likoni) en un sistema silvopastoril con leucaena (*Leucaena leucocephala* vc. Perú). *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 42(3), 295-298.
- Argel, M., Pedro, J., Miles, J. W., García, G., David, J., Cuadrado Capella, H., & Lascano, C. E. (2007). Cultivar Mulato II (*Brachiaria híbrido* CIAT 36087):

gramínea de alta calidad y producción forrajera, resistente a salivazo y adaptada a suelos tropicales ácidos bien drenados. CIAT.

- Arizmendi-Maldonado, D., McDowell, L. R., Sinclair, T. R., Mislevy, P., Martin, F. G., & Wilkinson, N. S. (2002). Mineral concentrations in four tropical forages as affected by increasing daylength. II. Microminerals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(11-12), 2001-2009.
- Arteaga, C. V. (2014). Estado nutricional del ganado y acumulación de forraje en una unidad de producción de becerros. (Tesis de Maestría en Ciendias. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México).
- Ayala-Burgos, A. J., Capetillo L. C. M., Cetina G. R. H., Zapata C. C., & Sandoval C. A. A. (2006). Composición química-nutricional de árboles forrajeros: Compilación de análisis del laboratorio de nutrición animal. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc. México. 60 p. (ISBN 970-94223-2-4).
- Beede, D. K. (2012). What will our ruminants drink? *Animal Frontiers*, 2(2), 36-43.
- Benítez B., Y., A. Bernal H., E. Cortés D., G. Vera C., & F. Carrillo A. (2010). Producción de forraje de guaje (*Leucaena spp.*) asociado con zacate (*Brachiaria brizantha*) para ovejas en pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1(3), 397-411.
- Blood, D. C. (2000). Pocket companion to veterinary medicine (No. Ed. 2). WB Saunders Company Ltd.
- Bogdan, A. V. (1997). Pastos tropicales y plantas de forraje (Pastos y leguminosas). 421p.
- Combatt, E., Jarma, A., & Maza, I. (2008). Growth of *Brachiaria decumbens* stapf and *Cynodon nlemfuensis vanderyst* in acid sulphate soils of Córdoba. *Revista MVZ Córdoba*, 13(2), 1380-1392.
- Cuadrado, H., Torregroza, L., & Garcés, J. (2005). Producción de carne con machos de ceba en pastoreo de pasto híbrido mulato y *Brachiaria decumbens* en el valle del Sinú. *Revista MVZ Córdoba*, 10(1), 573-580.
- Cuartas Cardona, C. A., Naranjo Ramírez, J. F., Tarazona Morales, A. M., Murgueitio Restrepo, E., Chará Orozco, J. D., Ku Vera, J., & Barahona Rosales, R. (2014). Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 27(2), 76-94.
- De la Guardia, M., & Garrigues, S. (2015). Handbook of mineral elements in food. John Wiley & Sons. Essential Mineral Elements. Marcel Dekker, Inc., New York. pp: 1-12
- Eruvbetine, D. (2003). Canine nutrition and health. In *A paper presented at the seminar organized by Kensington Pharmaceuticals Nig. Ltd., Lagos on August*. 21p.
- Euclides, V. P. B., Cardoso, E. G., Macedo, M. C. M., & Oliveira, M. D. (2000). Consumo voluntario de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob pastejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 29(6), 2200-2208.

- García, G., David, J., & Meléndez Nava, F. (2003). Pasto mulato. *Brachiaria híbrida* (CIAT 36061): Excelente alternativa para producción de carne y leche en zonas tropicales. Instituto para el Desarrollo de Sistemas de Producción del Trópico Húmedo de Tabasco. 21 p.
- Georgievskii, V. I., Annenkov, B. N., & Samokhin, V. T. (1982). Mineral Nutrition of Animals. Butterworths. UK. 475 p.
- Gómez Castro, H., Nahed Toral, J., Tewolde, A., Pinto Ruiz, R., & López Martínez, J. (2006). Áreas con potencial para el establecimiento de árboles forrajeros en el centro de Chiapas. *Técnica Pecuaria en México*, 44(2), 219-230.
- Grether, R., Martínez-Bernal, A., Luckow, M., & Zárate, S. (2006). Mimosaceae. Tribu Mimoseae. *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Dávila, A.P.D.; Villaseñor, R.J.L., 48-79.
- Gupta, U. C., & Gupta, S. C. (2014). Sources and deficiency diseases of mineral nutrients in human health and nutrition: a review. *Pedosphere*, 24(1), 13-38.
- Hoelt, R. G., Aldrich, S. R., Nafziger, E. D., & Johnson, R. R. (2000). Modern corn and soybean production. MCSP Publications, Champaign, IL. 353 pp.
- Huerta, B. M. (1999). Diagnóstico del estado mineral de explotaciones bovinas en México. *Memorias II Seminario internacional estrategias de suplementación a bovinos en pastoreo*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México, 154-172.
- Interián Ku, V. M., García Moya, E., Hernández, V., Ignaciaseso, J., Romero Manzanares, A., de la Rosa, B., & Vaquera Huerta, H. (2009). Crecimiento, arquitectura y anatomía de especies forestales en una selva baja caducifolia del sur de Yucatán (No. Tesis.). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Postgrado de Botánica.112.
- Khan, Z. I., Ashraf, M., & Hussain, A. (2007). Evaluation of macro mineral contents of forages: Influence of pasture and seasonal variation. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 20(6), 908
- Kincaid, R. L. (2000). Assessment of trace mineral status of ruminants: A review. *Journal of Animal Science*, 77(E-Suppl), 1-10.
- Luccerini, S., Subovsky, E., & Borodowski, E. (2013). Sistemas Silvopastoriles: una alternativa productiva para nuestro país. *Apuntes Agroeconómicos*, 7.
- McDowell, L., Velásquez, P., Valle, G. (1997). Deficiencias y toxicidades y su efecto en la producción de rumiantes en el trópico. Universidad de la Florida. Departamento de Zootecnia. (3). 86.
- McDowell, L. R. (1985). Nutrition of Grazing Ruminants in Warm Climates. *Academic Press*, FL. 443.
- McDowell, L. R., & Arthington, J. D. (2005). Minerals for grazing ruminants in tropical regions. Universidad de florida Gainesville. (4). 71-88.
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., & Morgan, C. A. (2006). Nutrición Animal. Zaragoza, España Acribia (6). 587.

- Mejía Díaz, E., Mahecha Ledesma, L., & Angulo Arizala, J. (2017). *Tithonia diversifolia*: especie para ramoneo en sistemas silvopastoriles y métodos para estimar su consumo. 28(1), 289-302.
- NRC National Research Council. (1980). Mineral Tolerance of Domestic Animals. National Academies Press. 586.
- NRC National Research Council. (2001). Nutrient Requirements of Dairy Cattle. National Academies Press. 360.
- NRC National Research Council. (2005). Mineral Tolerance of Animals. National Academies Press. (2).496.
- O'Dell, B. L., & Sunde, R. A. (1997). *Handbook of Nutritionally Essential Mineral Elements*. Marcel Dekket, New York. 68-153
- Olkowski, A. A. (2009). *Livestock water quality: A field guide for cattle, horses, poultry and swine*. Agriculture and Agri-Food Canada. 122-178.
- Pedroche, S. Z. (1994). Revisión del género *Leucaena* en México (parte C). *Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica*, 65(2), 83-162.
- Perego, J. 1999. *Brachiaria brizantha*: implantación, manejo y producción. Noticias y comentarios-INTA. Noticias y comentarios. INTA. EEA Mercedes. Corrientes, Argentina. 6 p.
- Pinto, R., Medina, F., Gómez, H., Guevara, F., & Ley, A. (2014). Caracterización nutricional y forrajera de *Leucaena collinsii* a diferentes edades de corte en el trópico seco del sur de México. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 31(1), 78-99.
- Puls, R. (1988). *Mineral Levels in Animal Health. Diagnostic data*. Sherpa International.154.
- Quevedo, P. M. (2014). Efecto de un sistema silvopastoril sobre la calidad de la leche, comparado con un sistema de producción convencional. (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira). 103.
- Román-Cortés, N., García-Mateos, M. D. R., Castillo-González, A. M., Sahagún-Castellanos, J., & Jiménez-Arellanes, A. (2014). Componentes nutricionales y antioxidantes de dos especies de guaje (*Leucaena spp.*): un recurso ancestral subutilizado. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 20(2), 157-170.
- Simsek, A., & Aykut, O. (2007). Evaluation of the microelement profile of Turkish hazelnut (*Corylus avellana* L.) varieties for human nutrition and health. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 58(8), 677-688.
- Smith, J. W., Adebawale, E. A., Ogundola, F. I., Taiwo, A. A., Akpavie, S. O., Larbi, A., & Jabbar, M. A. (2000). Influence of minerals on the aetiology of geophagia in periurban dairy cattle in the derived savannah of Nigeria. *Tropical Animal Health and Production*, 32(5), 315-327.
- Soetan, K. O., Olaiya, C. O., & Oyewole, O. E. (2010). The importance of mineral elements for humans, domestic animals and plants-A review. *African Journal of Food Science*, 4(5), 200-222.

- Solorio-Sánchez, F. J., Bacab-Pérez, H. M., & Ramírez-Avilés, L. (2011). Los Sistemas Silvopastoriles Intensivos: Avances de Investigación en el Valle de Tepalcatepec, Michoacán. In *Memorias III Congreso sobre Sistemas Silvopastoriles Intensivos, para la ganadería sostenible del siglo XXI*. Morelia, México: Fundación Produce Michoacán, COFRUPO, SAGARPA, Universidad Autónoma de Yucatán–UADY.
- Sosa Rubio, E. E., Pérez Rodríguez, D., Ortega Reyes, L., & Zapata Buenfil, G. (2004). Evaluación del potencial forrajero de árboles y arbustos tropicales para la alimentación de ovinos. *Técnica Pecuaria en México*, 42(2). 129-142.
- Suárez Intriago, M. D. (2013). Comportamiento agronómico y valor nutritivo de seis gramíneas forrajeras con fertilización química en la Zona de Pichincha. (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ). 5-73.
- Suttle, N. F. (2010). *Mineral Nutrition of Livestock*. Cabi. 4ª ed. 565 p.
- Trejo, A. (2016). Comportamiento productivo de ovinos en un sistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala* asociado a *Megathrsus maximus* var. Mombasa versus agostadero. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo.
- Tsuzukibashi, D., Costa, J. P., Moro, F. V., Ruggieri, A. C., & Malheiros, E. B. (2016). Anatomía cuantitativa, digestibilidad in vitro y composición química de cultivos de *Brachiaria brizantha*. *Revista de Ciencias Agrarias*, 39(1), 46-53.
- Underwood, E. J., & Suttle, N. F. (2003). Los Minerales en la Nutrición del Ganado 3a ed. Acribia. Zaragoza. pp: 6.
- Villalobos, L., & Arce, J. (2013). Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. I. Disponibilidad de biomasa y fenología. *Agronomía Costarricense*, 37(1), 91-101.
- Vivas May, E. F., Rosado Rubio, J. G., Castellanos Ruelas, A. F., Heredia y Aguilar, M., & Cabrera-Torres, E. J. (2011). Contenido mineral de forrajes en predios de ovinocultores del estado de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 2(4), 465-475.
- Wild, A., & Jones, L. H. P. (1992). Nutrición mineral de las plantas cultivadas. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russel*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 73-119.

3 DIAGNÓSTICO MINERAL DE BOVINOS EN UNA UNIDAD DE PRODUCCIÓN SILVOPASTORIL EN EL ESTADO DE YUCATÁN

3.1 Resumen

Se realizó un diagnóstico del estado mineral en una unidad de producción bovina (UP) silvopastoril en la región noroeste de Yucatán, México. El objetivo fue cuantificar el contenido de calcio (Ca), fósforo (P), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), selenio (Se), cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn) en suelo y suero sanguíneo; adicionalmente manganeso (Mn) para forraje y azufre (S) en agua. En forraje se determinó materia seca (MS), materia orgánica (MO), cenizas (C), extracto etéreo (EE), proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), y fibra detergente ácido (FDA). Los suelos de la unidad de producción tuvieron deficiencias de P, Cu, Zn y excesos en Ca, Fe y K. El agua presentó deficiencias en contenido mineral. Las gramíneas y leguminosas fueron deficientes en Mg, Cu y Zn, mientras que las gramíneas también fueron en Na y P. La mejor calidad del forraje se obtuvo a 90% de madurez, presentando el mejor momento de aprovechamiento en relación con 60 y 70% de madurez. En suero sanguíneo existe deficiencia de Cu y Mg, y en menor grado de Zn en los animales de la unidad de producción. El fósforo es un elemento crítico porque está deficiente en gramíneas y en animales adultos.

Palabras clave: Contenido mineral, porcentaje de madurez, arbóreas forrajeras, forrajes tropicales.

3.2 Abstract

A diagnosis of the mineral state was made in a bovine silvopastoral production unit (UP) in the northwest region of Yucatan, Mexico. The aim of this study was to quantify the mineral content in soil and blood serum of calcium (Ca), phosphorus (P), magnesium (Mg), potassium (K), sodium (Na), selenium (Se), copper (Cu), iron (Fe) and zinc (Zn), and the content of sulphur (S) in water and manganese (Mn) in forage. Dry matter (MS), organic matter (OM), ash (C), ether extract (EE), crude protein (PC), neutral detergent fiber (NDF); and detergent fiber acid (FDA) were estimated in Forage. The soils of the production unit had deficiencies of P, Cu, and Zn, and excesses of Ca, Fe y K. The water presented deficiencies in mineral content. The grasses and legumes were deficient in Mg, Cu and Zn, whereas the grasses were also deficient in Na and P. The forage of the best quality was obtained at 90% of maturity, compared with the quality at 60 and 70%. In Blood serum of the animals, there were found deficiencies of Cu and Mg, and in a less proportion of Zn. Phosphorus is a critical mineral because it showed deficiencies in grasses and adult animals.

key words: Mineral content, maturity percentage, fodder tree, tropical forages.

3.3 INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria sigue siendo de alta prioridad en el desarrollo de los países de Latinoamérica, en donde la producción ganadera desarrolla un papel fundamental. Por lo anterior, existe estrecha relación en el uso de los recursos naturales y la necesidad de orientar la producción ganadera a sistemas más sustentables y amigables con el medio ambiente (Cuartas et al., 2014). En América Latina las gramíneas tropicales y subtropicales siguen siendo la base principal de la alimentación ganadera, expuestas a condiciones climatológicas en constante transformación, sometida al pastoreo intensivo, donde los forrajes consumidos por los animales son de una calidad nutricional de media a baja (proteína, energía y minerales); la dieta diaria del ganado está asociada con alto contenido de carbohidratos estructurales, bajo contenido de carbohidratos solubles, contenidos de proteína menores al 7% y una digestibilidad menor al 55% (Barahona, Sánchez, Murgueitio & Chará, 2014; Restrepo, Rosales, Estrada, Orozco & Herrera, 2016).

Ante esta situación, los sistemas silvopastoriles desempeñan un papel importante en la producción ganadera, especialmente en las zonas tropicales donde la demanda de alimentos de alta calidad está en aumento y donde los sistemas convencionales de alimentación con monocultivos de gramíneas ponen en riesgo la producción ganadera existente (Cuartas et al., 2014). Sin embargo, para satisfacer los requerimientos nutricionales de los rumiantes en los sistemas silvopastoriles, se debe proveer de minerales acorde al nivel de producción que se desee alcanzar (McDowell y Arthington, 2005). El objetivo del presente estudio fue determinar el estado mineral del ganado y los componentes químicos y minerales de las gramíneas y leguminosas asociados en un sistema silvopastoril en el estado de Yucatán, que afectan los requerimientos minerales de los animales en pastoreo.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el rancho Nueva Alianza ubicado en Yaxcopoil, municipio de Umán, estado de Yucatán, localizado entre las coordenadas 20°45'0.31" N y 89°43'17.05" O. La unidad de producción (UP) tiene como objetivo la producción de

becerros al destete en un sistema silvopastoril con manejo rotacional racional, en 226 potreros de 2500 m² cada uno, dividida la propiedad en 4 secciones, a una altitud de 7 metros sobre el nivel del mar. El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano; la precipitación media anual es de 1006 mm por año, distribuidos principalmente en los meses de junio a septiembre y con temperatura media anual de 26.1°C.

3.4.2 *Colecta y procesamiento de las muestras*

La toma de muestras de los componentes suelo, agua, forraje y animales del sistema silvopastoril se realizó durante el mes de octubre del 2016.

Agua

El agua se colectó en botellas de plástico, previamente identificadas, directamente de las fuentes de bebida utilizadas por el ganado. Cada una con volumen aproximado de 500 ml, las cuales se mantuvieron en refrigeración hasta el análisis de la composición mineral. Las muestras de agua fueron filtradas con papel Whatman® del número 542 para su análisis mineral. Una vez filtradas, se expusieron aproximadamente 20 ml al proceso de digestión con ácido clorhídrico (5% volumen/volumen); otro volumen aproximado de agua filtrada fue digerida con ácido nítrico (3%) para cuantificar fósforo, mediante el procedimiento recomendado por Olmos, Marqués & Moreto (2003).

Suelo

La unidad de producción está dividida en cuatro secciones de pastoreo. En cada sección se colectó cinco muestras de suelo; cada muestra de suelo se obtuvo a profundidad de 15 a 20 cm evitando contaminación por heces y materia vegetal. Las muestras se depositaron en bolsas de plástico previamente identificadas con el número de sección establecida. Posteriormente, las muestras se secaron en una estufa de aire forzado a una temperatura de 55° C durante 72 horas; después fueron molidas en un mortero y se cernieron en una malla con criba de 0.25mm. La digestión de las muestras se realizó siguiendo las indicaciones del manual de uso del espectrofotómetro de absorción atómica Pekín-Elmer (1996); el procedimiento consistió en pesar 5 g de suelo, a los cuales se le adicionó 5 ml de ácido nítrico

concentrado y 2 ml de peróxido de hidrogeno, antes de ingresar al autoclave por 15 minutos.

Suero sanguíneo

Los animales muestreados fueron vacas adultas y animales jóvenes. Se obtuvieron muestras de sangre de 12 vacas y 12 animales jóvenes, obtenidas mediante punción de la vena yugular en las crías y punción de la vena coccígea en vacas adultas, utilizando agujas calibre 18 y tubos recolectores tipo Vacutainer® sin anticoagulante. Se colectaron dos muestras de sangre por animal de aproximadamente 10 ml cada una, siguiendo la metodología descrita por Fick (1976). El suero fue separado de la muestra sanguínea por centrifugación a 1500 rpm durante 10 a 15 min; después de una hora de reposo se procedió a separar el suero sanguíneo manteniéndose éste en congelación a -20°C hasta la determinación de los minerales.

Forraje

De acuerdo con el porcentaje de madurez del forraje se colectaron 5 muestras de aproximadamente 500g al 60, 70, 80, 90 y 100 porciento de madurez, mediante muestreo dirigido “Hand Plucking” descrito por Penning (2004). Las evaluaciones se hicieron considerando la cobertura de forraje y porcentaje de madurez del mismo, tomando como referencia 20% a los pastos recién pastoreados y 100% al pasto ya maduro. Cuando el pasto alcanza el 100% de madurez se observan plantas bien desarrolladas con abundantes semillas. Con base en lo anterior, el porcentaje de madurez para la cosecha del forraje se determinó por el estado fisiológico de la planta siguiendo lo establecido por Harris (1970). Se colectaron 5 muestras de aproximadamente 800g de cuatro especies arbóreas en el sistema silvopastoril, mediante muestreo dirigido “Hand Plucking” descrito por Penning (2004). Las muestras de forraje y leguminosas se manejaron de acuerdo a los procedimientos recomendados por Fick (1976). Éstas se secaron en una estufa con aire forzado a temperatura de 55°C durante 48 horas, y después se molieron en un molino tipo Wiley con una criba de acero inoxidable de 1mm. De cada muestra de forraje molido se tomaron 0.2g para incinerar en una mufla marca Felisa®, a temperatura de 500°C

durante 6 horas. Las cenizas resultantes fueron solubilizadas en ácido clorhídrico al 50% y posteriormente al 10%.

3.4.3 Análisis de laboratorio

Minerales

Las concentraciones de calcio, fósforo, potasio, sodio, magnesio, cobre, hierro y zinc en muestras de suelo y suero sanguíneo, adicionalmente se midió Manganese en forrajes y en agua azufre. Además de los minerales, en las muestras de suelo se determinó pH y en las de forraje: materia seca y orgánica, cenizas, extracto etéreo, proteína cruda y fibra cruda, detergente neutro, y detergente ácido.

Para la determinación de los contenidos de calcio, potasio, sodio, magnesio, cobre, hierro, zinc, manganeso y azufre se determinaron con las técnicas de espectrofotometría de absorción atómica con el equipo de marca Perkin-Elmer, modelo AAnalyst® 700, siguiendo el procedimiento descrito por Fick (1976) y Perkin-Elmer (1996). La concentración de fósforo se determinó por la metodología de calorimetría Fick et al. (1976), mediante un espectrofotómetro UV/VIS modelo Lambda 2 de Perkin-Elmer.

Materia seca

La materia seca se determinó mediante la diferencia entre el peso fresco y peso seco de cada muestra y el resultado multiplicado por 100 para obtener el porcentaje de humedad de la muestra; mediante diferencia (100 - % de humedad) se determinó el porcentaje de materia seca de cada muestra. Para la determinación de los componentes nutrimentales de las muestras se utilizó una estufa de aire forzado a 105°C, con sub-muestras secas pesadas en una balanza analítica, utilizando la metodología propuesta por Harris (1970). Las muestras fueron analizadas por triplicado siendo el promedio el valor registrado para cada determinación.

Extracto etéreo

Para determinar el porcentaje de grasa del material vegetal, se utilizó el método Soxhlet (De Castro & Garcia-Ayuso, 1998).

Proteína cruda

Para el análisis de la proteína cruda de los forrajes cosechados se determinó el nitrógeno total por el método Micro-Kjeldahl (Harris, 1970). Al obtener el nitrógeno total de cada muestra se multiplicó el valor por 6.25, lo cual resulta en el porcentaje de proteína total o proteína cruda.

Fibra cruda

Para la determinación de fibra cruda se utilizó el análisis proximal o de Weende (AOAC, 2000).

Cenizas

De cada muestra de forraje molido se tomaron 0.2 g para incinerar en una mufla marca Felisa®, a temperatura de 500°C durante 6 horas.

Materia orgánica

La estimación del porcentaje de material orgánico en las muestras se obtuvo por diferencia entre los porcentajes de materia seca y de cenizas (AOAC, 2000).

Fibra detergente neutro

Para la determinación de FDN se utilizó detergente neutro y la metodología propuesta por Van Soest, Robertson & Lewis (1991).

Fibra detergente ácido

Para la determinación de FDA se utilizó la solución detergente ácido propuesto por Van Soest et al. (1991).

Determinación de pH

La determinación del pH se realizó mezclando una fracción de suelo con agua desionizada en proporción 1:2 peso/volumen, agitando durante 10 minutos, después de lo cual se hizo la lectura en fase líquida, utilizando un potenciómetro Microprocessor pH 210, marca HANNA® Instruments.

3.4.6 Análisis estadístico

Para hacer el análisis estadístico se consideró como variable de respuesta (Y_{ij}) el contenido de cada mineral en suelo, agua, forraje y suero sanguíneo; así como, los contenidos de PC, EE, FDN, FDA y MO, determinados en el forraje colectado. Estos datos se analizaron mediante el procedimiento para modelos lineales PROC GLM (SAS, 2016).

Los modelos estadísticos fueron: $Y_{ij} = \mu + A_i + \varepsilon_{ij}$ para el contenido de minerales en suero sanguíneo, donde el término Y_{ij} fue la concentración de cada mineral en suero sanguíneo, μ es la media general de la población para la concentración de minerales, y A_i corresponde al tipo de animal (adultos y jóvenes).

Para contenido de minerales en forraje el modelo fue $Y_{ij} = \mu + E_i + \varepsilon_{ij}$ así como para el contenido de PC, EE, FDN, FDA, C, MST y MO en el forraje colectado, donde Y_{ij} fue la concentración de cada mineral y el contenido de PC, EE, FDN, FDA, C, MS y MO en el forraje; μ es la media general, E_i el efecto de la i -ésima especie de forraje (i = gramínea y leguminosa). Para contenido de minerales en gramíneas, así como para el contenido de PC, EE, FDN, FDA, C, MST y MO en el forraje, el modelo fue $Y_{ijk} = \mu + M_j + \varepsilon_{ijk}$. Donde Y_{ijk} fue la concentración de cada mineral y el contenido de PC, EE, FDN, FDA, C, MS y MO en el forraje; μ es la media general, M_j fue el efecto del j -ésimo porcentaje de madurez (j = 60, 70, 80, 90 y 100) de la gramínea.

Para el contenido de minerales en suelo y agua el modelo fue $Y_{ij} = \mu + E_i + \varepsilon_{ij}$. Donde Y_{ij} fue la concentración de cada mineral en suelo y agua; μ es la media general, E_i el efecto de sección de pastoreo muestreada (j = 1, 2, 3 y 4); para la variable agua sólo fue evaluada la concentración mineral en la sección 1. Finalmente, para todos los modelos el término ε_{ijk} corresponde al error experimental para la i -ésima, j -ésima o k -ésima medición. La comparación de medias se realizó con el procedimiento Tukey para efectos simples, usando el procedimiento PROC GLM (SAS, 2016).

3.5 Resultados y discusión

En este apartado se discuten las concentraciones minerales de suelo- agua-forraje-animal y el contenido nutrimental del forraje.

3.5.1 Concentración mineral en suelo

El Cuadro 5 muestra la concentración de minerales y pH del suelo en las diferentes secciones de pastoreo, quienes mostraron similares ($p < 0.05$) concentraciones de calcio, fósforo, magnesio, sodio, potasio, cobre, hierro y zinc. Mientras que el pH fue diferente ($p < 0.01$) entre las secciones de pastoreo.

Cuadro 5. Concentración de minerales (mg kg^{-1}) y pH en suelo en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Variable	Sección de pastoreo				EEM x	Pr>F ^y	Nivel mínimo ^z	Intervalo ^w
	1	2	3	4				
Ca	3210	4835	7255	3545	1259	0.07	70**	1000-2000**
P	4	7	5	3	0.98	0.05	10**	<350***
Mg	4050	6533	6688	6675	1338	0.83	8.5**	23000***
Na	1148	1526	1216	1206	197	0.90	62*	200-10000*
K	5444	8458	7138	5054	1018	0.56	59**	100-4000***
Cu	30	25	13	21	4.7	0.06	5***	25-60 ****
Fe	59523	63473	41788	54235	10385	0.68	5**	10000 -50000**
Zn	24	25	30	33	3.9	0.46	10*****	10-300*****
pH	7.8	7.5	7.5	7.3	0.11	<0.01	-	-

^xEEM= error estándar de la media.

^yPr>F= nivel de significancia ($p < 0.05$).

^zNM= nivel mínimo para el desarrollo de las plantas (Rhue, & Kidder, 1983*; McDowell, 1985**; Shorrocks & Alloway, 1986***; Castellanos, Uvalle Bueno & Aguilar Santelises, 2000****; Alloway, 2008) *****).

^w= Extremos mínimos y máximos comúnmente hallados en suelos (Whitehead, 2000*; Vázquez et al., 2011***; Shorrocks & Alloway, 1986****; Alloway, 2008*****).

Considerando los valores medios indicados en el Cuadro 5, así como el nivel mínimo necesario en suelo para obtener buen crecimiento de los forrajes, se observa que las concentraciones de P, Cu y Zn resultaron insuficientes para cubrir los requerimientos para el desarrollo de las plantas, de acuerdo con los valores reportados por McDowell (1985) y Shorrocks & Alloway (1986). Las concentraciones bajas de P y Cu se pueden asociar a la limitada adsorción de estos minerales en suelos neutros, alcalinos o calcáreos, descritos por Alloway (1995), debido a la retención ocasionada por complejos superficiales. Mortvedt (2000) reporta que la concentración de cobre en el suelo oscila de 2 a 200 mg kg^{-1} , con concentración media de 30 mg kg^{-1} , datos que coinciden con lo obtenido en la presente investigación (22 mg kg^{-1}).

Las concentraciones de Ca, K y Fe fueron mayores a las indicadas en los estudios de Shorrocks & Alloway (1988) y McDowell (1985), respectivamente. Las investigaciones de Vivas-May et al. (2011) y Bautista Zúñiga, Garcia & Mizrahi (2005) indican que esta condición puede ocurrir por un exceso de Ca en el suelo, originando problemas de enraizamiento de los pastos y escasa retención de humedad por la baja cantidad de tierra fina, debido a la capacidad de retención de los carbonatos al aumentar el pH (Roca, Pazos & Bech., 2007). El pH promedio obtenido del suelo, corresponde a un suelo alcalino con pH entre 7.5 a 8.5 (Hopkins & Ellsworth, 2005).

La disponibilidad de los micronutrientes Cu, Mn, Co, tiende a disminuir conforme el pH del suelo se hace más alcalino (Whitehead, 2000), suelos con pH de 6.5, siempre presentan mayor disponibilidad de estos micronutrientes siempre y cuando la concentración sea alta (Nyambaka, Shisia, Ngure & Oduor, 2013).

Las concentraciones altas de Fe podrían explicarse por la naturaleza del suelo que es del tipo entisol cuyo material parental es rico en Fe y Al (Arévalo & Rivera, 2013) y al alto contenido de arcillas diversos óxidos de Fe insolubles (Fe^{3+}), presentándose como revestimientos de gel de partículas en el suelo o como partículas finas amorfas en la fracción de arcilla (Barker & Pilbeam, 2015).

3.5.2 Concentración mineral en agua

El Cuadro 6 presenta las concentraciones de minerales en el agua de bebida para el ganado; fósforo, Cu, Fe y Zn no fueron detectados con la técnica empleada, mientras que los niveles de Ca, Mg, Na, K y S se encontraron por abajo de los máximos tolerables propuesto por Puls (1988) y Socha, Ensley, Tomlinson & Johnson (2002).

Beede (2012) sugiere 300 mg L^{-1} de sulfato para el uso en la ganadería, sin embargo, no se indica ninguna recomendación para los límites máximos de Azufre. Socha et al. (2002), Pérez (2005) y NRC (2001) señalan que muestras provenientes de pozos semisurgentes los compuestos de S estuvieron por abajo de 300 mg L^{-1} coincidiendo con los valores encontrados en el presente estudio. Manera, Voltolini, Menezes & de Araújo (2016) manifiestan que diversas evaluaciones en agua presentan niveles de S inferiores a 200 mg L^{-1} , sin que se restrinja la ingesta de agua por los animales. Niveles

por arriba de 2000 mg L⁻¹ en agua de bebida influyen negativamente en la ingesta de agua por los animales.

Cuadro 6. Concentración de minerales (mg L⁻¹) en agua disponible para el ganado, en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Variable (mg L ⁻¹)	Sección	NMA ^y
	1	
Ca	72.86	<1000
P	ND ^x	<0.7
Mg	47.36	<1000
Na	172.86	<800
K	6.78	<20
Cu	ND	<1
Fe	ND	<0.04
Zn	ND	<8
S	11.17	< 150*

^xND = No Detectable.

^yNMA=Nivel máximo recomendable de minerales en agua de bebida para el ganado bovino (Puls,1988; Socha et al., 2002*).

El agua disponible para los animales de esta unidad de producción no constituyó una fuente importante de minerales, lo cual coincide con lo indicado por McDowell y Arthington (2005) y Beede (2005) para el trópico. Cuantificar los minerales que el agua proporciona al ganado es complejo, debido a que el aporte es escaso para una nutrición mineral adecuada. De acuerdo con Beede (2005) es poco probable que estas concentraciones de minerales en el agua de bebida puedan ocasionar problemas de salud en el ganado, aunque los bovinos consuman agua en cantidades de 8 a 12% de su peso vivo.

3.5.3 Concentración mineral en forrajes

En el Cuadro 7 se observan las concentraciones de los minerales en gramíneas disponibles para el ganado bovino con diferentes porcentajes de madurez. Las concentraciones de Ca, Mg, Cu, Zn, Fe y Mn variaron ($p<0.01$) con los porcentajes de madurez al igual que el Na ($p<0.05$).

Cuadro 7. Concentración mineral en el forraje de gramíneas con diferentes porcentajes de madurez en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Variable	Porcentaje de madurez					EEM ^z	Pr>F	NMB ^x	NM ^y
	60	70	80	90	100				
Ca %	0.68 ^{ab}	0.72 ^{ab}	0.60 ^b	0.82 ^a	0.70 ^{ab}	0.04	<0.01	0.30	1.5
P %	0.14 ^a	0.16 ^a	0.16 ^a	0.14 ^a	0.20 ^a	0.02	0.75	0.25	0.7
Mg %	0.06 ^a	0.04 ^b	0.05 ^a	0.03 ^{bc}	0.02 ^c	0.01	<0.01	0.20	0.60
Na %	0.04 ^{bc}	0.06 ^a	0.03 ^b	0.06 ^{ab}	0.04 ^{abc}	0.01	<0.05	0.06	1.60
K %	1.58 ^a	1.64 ^a	1.78 ^a	1.72 ^a	1.68 ^a	0.05	0.19	0.8	3
Cu mg kg ⁻¹	6.08 ^b	9.22 ^a	8.88 ^a	8.84 ^a	6.8 ^{4b}	0.6	<0.01	10	40
Zn mg kg ⁻¹	29.56 ^a	31.84 ^a	28.68 ^{ab}	24.74 ^b	27.96 ^{ab}	1.28	<0.01	40	500
Fe mg kg ⁻¹	128.93 ^c	193.16 ^a	105.82 ^c	116.4 ^c	154.13 ^b	14.26	<0.01	30	500
Mn mg kg ⁻¹	45.01 ^a	45.57 ^a	47.07 ^a	40.29 ^a	23.02 ^b	4.18	<0.01	40	50
Rel. Ca:P	4.55a	4.81	4.22a	5.61a	3.47	2.28	0.21	2:0-1.0	3.3:1.0

^zError = Error estándar de la media.

^xNMB= Nivel mínimo para cubrir los requerimientos del ganado bovino (McDowell & Arthington, 2005).

^yNM= Niveles máximos tolerables de minerales en la dieta de bovinos (NCR, 2005).

a, b, c Las medias en hileras dentro de porcentaje de madurez sin una letra en común, son diferentes (p<0.05)

El estado de madurez del forraje es de importancia en el contenido de proteína y de minerales en la planta, ya que durante la etapa inicial de crecimiento los pastos presentan alto contenido de minerales, pero esas concentraciones disminuyen gradualmente a medida que la planta madura (Rosas & Moreno, 2015). Esta información coincide con lo presentado en el Cuadro 7, donde las concentraciones de Mg, Zn, Mn y la relación Ca: P disminuyeron conforme se incrementó el estado de madurez del forraje; mientras que P y K se mantuvieron relativamente constantes durante los diferentes estadios de madurez del pasto. De acuerdo con el contenido de P en el forraje los niveles estuvieron por abajo del mínimo requerido (McDowell & Arthington 2005). Underwood & Suttle (2003) así como los estudios de Rosas & Moreno (2015) señalan que, generalmente, las concentraciones de P en los forrajes son deficientes, a medida que el forraje madura, aparece una reducción de las concentraciones de P en la planta, aunque la distribución dentro de la planta es

relativamente uniforme. Así mismo Carulla, Cárdenas, Sánchez & Riveros (2004) señalan que al madurar la planta las concentraciones de Cu, Co, Mo y Zn disminuyen, manteniéndose constantes y/o en menor concentración al resto de los minerales.

A diferencia, las concentraciones de Mn y K aumentaron conforme se incrementó la madurez del forraje sin llegar a los máximos tolerables (Cuadro 7). Probablemente, esta respuesta esté asociada con la mayor capacidad de las plantas para acumular mayor cantidad de minerales conforme van creciendo, aun por arriba de los niveles requeridos por los bovinos (Kabata-Pendias & Pendias, 2001; Muñoz-González, Huerta-Bravo, Lara-Bueno, Rangel-Santos, & de la Rosa-Arana, 2016).

El contenido Fe en este estudio mostró concentraciones inferiores al nivel máximo requerido para bovinos establecido por NRC (2005). Underwood & Suttle (2003) sugieren que las concentraciones elevadas de este mineral en los forrajes se deben probablemente a contaminación con tierra, que suele ocurrir en suelos con riesgo de inundación o en gramíneas procedentes de suelos ricos en Fe.

Los niveles de K presentados en el Cuadro 7 son inferiores al nivel máximo tolerable de acuerdo con el NRC (2005). Niveles altos de K en forrajes originan problemas en la absorción de Mg y se agravan con altos niveles de proteína en la dieta (Millan Cortes & Aguirre García, 1990). Underwood & Suttle (2003) señalan que las concentraciones de K en forrajes están influenciadas por la concentración de K en el suelo, en función de la especie de pasto, estado de madurez del mismo y el modo en el que se maneja la pradera. Alta concentración de K en el forraje de los pastos desarrolla hipercalcemia a través de deficiencias de magnesio en bovinos.

Los datos obtenidos acerca del contenido de Mg en forrajes (Cuadro 7) son similares a los reportados por McDowell & Arthington (2005), pero fueron menores al nivel mínimo requerido para cubrir los requerimientos del ganado bovino (NRC, 2005). McDowell & Arthington (2005) realizaron estudios con 930 muestras de gramíneas forrajeras templadas y tropicales, las cuales fueron deficientes en magnesio para el ganado en pastoreo, y de acuerdo con la especie cultivada puede presentarse la incidencia de tetania hipomagnesémica en función del contenido de proteína en el forraje. Whitehead (2000) y Underwood & Suttle (2003) indican que las

concentraciones de Mg disminuyen marcadamente con el avance de la madurez, coincidiendo con el presente trabajo.

El contenido de Na se mostró inferior al nivel crítico requerido para los bovinos. De acuerdo con los diferentes porcentajes de madurez del forraje ninguno sobrepasó el máximo tolerable (Cuadro 7). Esto coincide con McDowell (2003) donde señala que la mayoría de los forrajes son deficientes en sodio. Es más frecuente encontrar valores bajos de Na en forrajes tropicales que en forrajes de clima templado, ya que la distribución de las concentraciones de Na en los forrajes casi siempre se desvía hacia valores bajos (Minson 1990; Underwood & Suttle, 2003)

Las concentraciones minerales de Cu y Zn se encontraron por abajo del mínimo requerido por los animales (Cuadro 7). Esta información coincide con la señalada por McDowell & Arthington (2005). El bajo contenido de estos minerales afecta de manera directa en la concentración sérica de estos minerales esenciales para los animales en pastoreo. Estos valores bajos de Cu y Zn también coinciden con otros estudios realizados en Yucatán (Bores & Castellanos, 2003). Muñoz-González et al. (2016) reportaron que diversas gramíneas presentan menores concentraciones de Cu, pero mayores concentraciones de Fe; eso tiene importancia debido a que las concentraciones altas en Fe y presencia de S afectan la absorción del Cu en el animal. Sin embargo, estos antagonismos tienen poca influencia sobre los henos, en comparación con la hierba fresca. El antagonismo entre Cu y Fe influye sobre la absorción de cobre, dependiendo en parte de la concentración de S presente en la dieta. Por otra parte, los henos y pastos maduros tienden a ser pobres en Zn mientras que los ensilados tienden a ser ligeramente ricos (Underwood & Suttle, 2003).

Las concentraciones de Ca se encontraron por arriba del mínimo requerido (Cuadro 7). Algunos autores señalan que la concentración de Ca en la Península de Yucatán se encuentra en cantidades adecuadas en los forrajes (Millan et al., 1990). Por otro lado, la capacidad de un animal para absorber y utilizar el calcio va a depender del suministro que disponga de vitamina D; y el nivel de este mineral en las gramíneas es mayor en tejido vivo que en material muerto, por lo que la edad y madurez del pasto

es factor importante en la concentración de calcio en los forrajes (Underwood & Suttle, 2003).

El Cuadro 8 muestra los resultados del contenido promedio de minerales en las gramíneas y leguminosas de la unidad de producción silvopastoril.

Cuadro 8. Concentración mineral en gramíneas y leguminosas en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Familia	Minerales								
	Ca	P	Mg	Na	K	Cu	Zn	Fe	Mn
	-----%-----					-----mg kg ⁻¹ -----			
Gramíneas	0.71 ^a	0.16 ^a	0.045 ^a	0.05 ^a	1.68 ^a	7.95 ^a	28.55 ^a	139.68 ^a	40.19 ^a
Leguminosas	1.03 ^b	0.42 ^b	0.051 ^a	0.10 ^b	1.58 ^a	10.72 ^b	19.15 ^b	118.36 ^b	45.24 ^a
EEM ^z	0.05	0.01	0.01	0.03	0.05	0.48	1.24	6.73	1.92
Pr>F	<0.01	<0.01	0.28	<0.05	0.06	<0.01	<0.01	<0.05	0.06
RMB ^x	0.3	0.25	0.2	0.06	0.8	10	40	30	40
NM ^y	1.5	0.7	0.06	1.6	3	40	500	100	50

^{ab} Medias de gramíneas o leguminosas sin una letra en común en la misma columna son diferentes (P<0.05).

^z EEM = Error estándar de la media.

^x RMB = Nivel mínimo para cubrir los requerimientos del ganado bovino (McDowell & Arthington, 2005).

^y NM = Niveles máximos tolerables de minerales en la dieta de bovinos (NRC, 2005).

La concentración de Ca en leguminosas fue 1.4 veces mayor ($p<0.01$) que en gramíneas. Estos valores se encuentran dentro del rango de requerimientos para bovinos, tanto en leguminosas como en gramíneas superan el rango de requerimiento mínimo de acuerdo con McDowell & Arthington (2005). El NRC (2005) señala 1.5% de Ca como valor máximo tolerable para los animales, por lo que, el calcio no se considera un elemento tóxico para el animal ya que, el exceso, se excreta fácilmente vía fecal (Underwood & Suttle, 2003; Suttle, 2010). Sin embargo, las leguminosas presentan mayor proporción de Ca ligadas a la pared celular y concentraciones más altas de este mineral (Carulla et al., 2004). Vivas-May et al. (2011) indican como alta, la probabilidad que las leguminosas tengan mayor contenido de Ca que las gramíneas; y el hecho que los forrajes resulten con elevado contenido de Ca se explica por la presencia de leguminosas. Contrariamente a la insuficiencia de calcio hallada en los forrajes, sobre todo en el suelo, otros autores han señalado que el origen calcáreo marino del suelo del estado de Yucatán, les confiere un adecuado contenido de Ca (Sosa, Cabrera &

Pérez, 2006; Cabrera Torres, Sosa Rubio, Castellanos Ruelas, Gutiérrez Baeza & Ramírez Silva, 2009).

El contenido de P en leguminosas fue 2.6 veces mayor ($p < 0.01$) que en las gramíneas y la concentración en las gramíneas esta por abajo del mínimo requerido para bovinos (McDowell & Arthington, 2005). Los forrajes de climas templados contienen generalmente más P que los forrajes tropicales, y las leguminosas ligeramente más que las gramíneas, como se puede observar en el presente trabajo (Minson, 1990; Underwood & Suttle, 2003).

El contenido de Mg fue similar ($p > 0.05$) entre leguminosas y gramíneas (Cuadro 8), aunque los contenidos promedios de Mg se ubican por abajo del requerimiento mínimo para bovinos (McDowell & Arthington, 2005). Sin embargo, se encontraron deficiencias de este mineral en el suelo. Underwood & Suttle (2003) señalan que, en pastos templados, las especies leguminosas suelen ser más ricas en magnesio que las gramíneas, al igual que en calcio. Charlton & Armstrong, (1989) indican que la deficiencia de este mineral puede agravarse por interferencia del K, y por deficiencias de Na.

El contenido de K fue similar ($p > 0.05$) en ambas familias forrajeras presentando niveles por arriba del valor crítico para bovinos (McDowell & Arthington, 2005). Especies de gramíneas de estación fría mantienen concentraciones de K superiores a las especies de estación cálida y las leguminosas tropicales contienen niveles inferiores que las leguminosas templadas. Como se puede observar en el presente estudio el contenido de K no fue diferente entre gramíneas y leguminosas, lo cual difiere con lo reportado en otros resultados (Underwood & Suttle, 2003).

El contenido de Na en gramíneas y leguminosas fue diferente ($p < 0.05$), en las leguminosas registraron el doble de Na que las gramíneas. Edmeades & O'Connor (2003) señalan que la deficiencia de sodio se debe a que los forrajes normalmente son pobres en este mineral debido a que éste no es un elemento esencial para las plantas, y a que es de fácil lixiviación en el suelo. Otro estudio señala que los pastos que se encuentran en los primeros 25 km de distancia de las costas pueden ser tres veces más ricos en Na que aquellos situados al interior del continente, debido al depósito de

Na procedente del mar (Underwood & Suttle 2003). Esto podría explicar el contenido de sodio en las gramíneas y leguminosas en el presente estudio.

El contenido de Cu fue 35% superior ($p<0.05$) en las leguminosas en comparación con las gramíneas. McDowell & Arthington (2005) coinciden con este estudio al encontrar que las leguminosas exceden a las gramíneas en la concentración de Cu. Diversos autores señalan que las leguminosas presentan concentraciones mayores de Ca, Mg, Cu y Zn que las gramíneas (Carulla et al., 2004; Vivas-May et al., 2011). Minson (1990) difiere en relación al Cu ya que él registró mayores concentraciones en las gramíneas que en las leguminosas.

El contenido de Zn fue 1.5 veces mayor ($p>0.01$) en las gramíneas en comparación con las gramíneas, sin embargo, los aportes de Zn en ambas familias no cumplieron con el mínimo requerido por el ganado bovino, coincidiendo con otros autores (Vivas-May et al., 2011; Cabrera et al., 2009).

El contenido de Fe tuvo mayor ($p<0.05$) concentración en gramíneas que en leguminosas ($p<0.05$), presentando niveles por arriba del máximo tolerable establecido por el NRC (2005). Diversos autores reportan concentraciones de Fe mayores en leguminosas en relación a las gramíneas, no coincidiendo con el presente estudio (Underwood & Suttle 2003). De acuerdo a Vivas-May et al. (2011) esto se puede relacionar con los contenidos marginales de Cu y Zn, de acuerdo a los excesos de Fe en los forrajes.

El contenido de Mn no presentó diferencias entre las especies forrajeras ($p>0.05$). De acuerdo con los datos del NRC (2005) los valores promedio de Mn se encuentran por abajo del máximo tolerable.

3.5.4 Concentración mineral en suero sanguíneo

En el Cuadro 9 se presentan las concentraciones minerales en suero sanguíneo de adultos y jóvenes. Los niveles de P, Fe, Zn, Cu y la relación Ca: P mostraron diferencias entre animales jóvenes y adultos ($p<0.01$). Puls (1988) en su investigación reportó que las concentraciones de Ca en suero sanguíneo en animales adultos y jóvenes se encontraron dentro del rango normal. En el presente estudio, los animales jóvenes y adultos tuvieron niveles adecuados de Ca en el suero sanguíneo,

probablemente debido a que los mecanismos homeostáticos del animal tienden a mantener las concentraciones séricas de este elemento en un rango aceptable para cubrir los requerimientos. La concentración de calcio mostró mayores valores en animales jóvenes que en animales adultos, probablemente por el consumo de leche, ya que este alimento contiene hasta un 0.95% de este elemento en base seca (NRC, 2005). Las investigaciones de Hove (1986) y Underwood & Suttle (2003), señalan que vacas adultas muestran reducción acentuada de Ca plasmático en el parto, que puede repetirse aproximadamente cada nueve días a medida que se reajustan las demandas de la lactancia. Así mismo, Martínez (2006) reportó mayor concentración de Ca en animales jóvenes que en animales adultos en pastoreo. La falta de calcio en el ganado en pastoreo es un problema mucho menor que la deficiencia de P, por lo que no se ha encontrado ninguna evidencia fehaciente en deficiencias de calcio en ganado vacuno y ovino en pastoreo. Además, el Ca no se considera un elemento tóxico, gracias a que los mecanismos homeostáticos hacen que el exceso de calcio de la ración sea defecado (McDonald, 1986; Underwood & Suttle, 2003).

Cuadro 9. Concentración mineral (mg L⁻¹) en suero sanguíneo de animales jóvenes y adultos, en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Variable (mg L ⁻¹)	Tipo de Animal		EEM ^z	Pr>F ^y	Intervalo adecuado ^y
	Jóvenes	Adultos			
Calcio	102.49 ^a	97.37 ^a	11.95	0.76	80-110
Fósforo	80.4 ^a	49.40 ^b	5.98	<0.01	60-90 ^w 45-60 ^x
Magnesio	15.24 ^a	14.17 ^a	1.44	0.61	18-35
Sodio	3357.1 ^a	3241.3 ^a	71.95	0.26	3,105-3,450
Potasio	234.48 ^a	215.95 ^a	12.38	0.3	160-200
Cobre	0.67 ^a	0.55 ^b	0.04	<0.04	0.8-1.5
Hierro	3.44 ^a	1.52 ^b	0.37	<0.01	1.3-2.5
Zinc	0.93 ^a	0.76 ^b	0.04	<0.01	0.8-1.4
Relación Ca:P	1.99 ^a	1.27 ^b	0.19	<0.01	1.3-2.5

^{ab} Medias de tipo de animal en la misma hilera sin una letra en común son diferentes (p<0.05).

^z EEM = Error estándar de la media.

^y Rango de concentración en suero sanguíneo de ganado bovino (Puls, 1988).

^x Rango de requerimientos para animales adultos (Suttle, 2010).

^w Rango de requerimientos para animales jóvenes (Suttle, 2010).

El efecto de la edad en el animal también puede intervenir en las concentraciones sanguíneas de fósforo, haciendo que el rango de requerimiento normal sea diferente para vacas y becerros (Puls, 1988). El alto contenido de fósforo en la dieta también es un factor que influye en la absorción de calcio (Suttle, 2010). En el presente estudio, los animales jóvenes tuvieron concentraciones mayores ($p < 0.01$) de P en suero sanguíneo que los observados en animales adultos. De acuerdo con las investigaciones de Puls (1988) la relación Ca: P adecuada en la dieta es de 1.3 a 2.5: 1, obteniéndose en el presente estudio una relación de 1.99: 1 (Cuadro 9), una relación inferior a 1.3: 1 podría originar problemas de cálculos urinarios (McDowell et al., 1997).

De acuerdo a los rangos reportados por Puls (1988) los animales jóvenes presentan una relación de 1.27: 1, encontrándose en el rango mínimo requerido. La menor relación Ca: P para las crías, respecto a las vacas, se debe a que el suero sanguíneo tuvo mayores concentraciones de fósforo respecto a las de Ca.

El contenido promedio de Mg en suero sanguíneo fue similar en animales jóvenes y adultos, presentando deficiencias de Mg de acuerdo a lo reportado por Puls (1988) quien establece requerimientos para bovinos de 18 a 35 mg L⁻¹. Al respecto, McDowell & Arthington (2005) señalan que la concentración de Mg solo disminuye en casos de deficiencia severa en los pastos. Con respecto a los animales adultos la concentración de Mg fue mayor que en los animales jóvenes; esto podría deberse a bajas concentraciones de Mg en la leche materna, ya que ésta constituye la fuente principal de alimentación para las crías (Underwood & Suttle, 2003). En animales adultos el bajo contenido de Mg se puede atribuir a que los forrajes tropicales presentan altos niveles de K, lo cual interfiere con la utilización del Mg, causando desordenes metabólicos durante el parto (NRC, 2001; Sánchez & Goff, 2006; Quinteros, Barbona, Vargas, Moyano & Marini, 2017). Goff (2008) y Sánchez & Saborío-Montero (2014) indican que valores inferiores a 18 mg L⁻¹ de Mg sérico en bovinos puede inducir a problemas de hipomagnesemia, afectando el metabolismo del calcio y reducción de la secreción de la hormona paratiroidea; teniendo una prevalencia del 3.95% en diferentes razas bovinas.

La concentración mineral de K en el suero sanguíneo de ganado bovino descrita por Puls (1998) es de 160 a 200 mg L⁻¹. En el Cuadro 9 las concentraciones de K en el suero sanguíneo fueron superiores a los valores establecidos por Puls (1998), presentando en promedio animales jóvenes (234.4 mg L⁻¹) y en animales adultos (215.9 mg L⁻¹). De acuerdo con Suttle (2010), los niveles altos de K en el forraje podrían ser la causa de mayor contenido de K sérico a partir de una mayor absorción de K y Na en el rumen. Las concentraciones de K pueden tener repercusiones a causa de las interacciones con otros minerales, ya que cuanto existe un incremento en las concentraciones sanguíneas de K, proporcionalmente se muestra un aumento de Na en el suero sanguíneo (Hutcheson, Cole & McLaren, 1984). Así mismo las concentraciones de Mg pueden ser afectadas, originando la despolarización de la membrana apical del epitelio ruminal, impidiendo la absorción del Mg (Goff, 2008). Los excesos de K en suero sanguíneo podrían deberse al alto contenido en el forraje, ya que, a medida que el nivel en la dieta aumenta también se incrementan los niveles plasmáticos de este mineral. Herlin & Andersson (1996) y Suttle (2010) señalan que la ingesta de suelo adherido a las plantas puede ocasionar un consumo activo desarrollando geofagia; ocasionando exceso en el consumo de K y una conducta patológica del animal a través de la inducción de deficiencia de Ca o Mg.

Las concentraciones promedio de Cu en suero sanguíneo presentadas en el Cuadro 9, muestran deficiencias en animales jóvenes y adultos, con promedios de 0.67 y 0.55 mg L⁻¹ de acuerdo con Puls (1988). Un dato de interés en el análisis fue que la deficiencia de Cu fue de menor magnitud ($p > 0.01$) en animales jóvenes que, en animales adultos, y esas deficiencias estuvieron asociadas con concentraciones insuficientes de este elemento en los forrajes (Cuadros 7 y 8). Las deficiencias de Cu conllevan a daños oxidativos de la membrana celular, proceso en el cual se libera K de los glóbulos rojos al fluido extracelular, incrementando la concentración en suero sanguíneo (Suttle, 2010). Rosa, Fazzio, Picco, Furnus & Mattioli (2008) y, por otro lado, Pedroso & Roller (2009) señalan que las deficiencias de Cu ocurren cuando la dieta contiene menos Cu que el requerido, denominada ésta como deficiencia primaria; pero cuando la absorción en la dieta es inhibida por otros minerales, se habla de deficiencia condicionada o secundaria. Cantidades altas de Fe, Mo, S y Zn pueden provocar

alteraciones en el metabolismo del Cu y limitar sus concentraciones en el suero sanguíneo (NADIS, 2012). Los signos clínicos asociados a la hipocuprosis, de acuerdo con la investigación de Rosa et al. (2008), indican alteraciones en pelaje, diarreas, trastornos articulares, menor resistencia a las infecciones y alteraciones en la reproducción, coincidiendo estos signos con lo observado en campo en el presente estudio. Además, los niveles elevados de Fe en el suelo y en el consumo probable del mismo por los animales, pueden contribuir a disminuir las concentraciones de Cu en suero sanguíneo (Suttle, 2010). McDowell y Arthington (2005) señalan que, a excepción del fósforo, la deficiencia de Cu es la limitante más importante para los animales en pastoreo en las regiones tropicales, provocando retardo en el crecimiento, acumulación de Fe en el hígado, decremento de la síntesis de hemoglobina en un estado tardío, y despigmentación al inicio de la deficiencia por causa de la baja actividad de la tirosina.

Underwood & Suttle (2003) relaciona la deficiencia de Cu con la acumulación hepática de hierro, incrementando la susceptibilidad o sobrecarga de hierro con la edad. A pesar de tener excesos de Fe, especialmente en las crías, los animales podrían presentar anemia, ya que de acuerdo con Suttle (2010), la deficiencia de cobre puede provocar hemólisis, la cual contribuye con altos contenidos de hierro extracelular. Los terneros alimentados con un exceso de Fe, aumentan las concentraciones de este mineral en hígado y bazo disminuyendo considerablemente el apetito y el crecimiento de los animales (Underwood & Suttle, 2003). Aun cuando las concentraciones de hierro en los forrajes son adecuadas, la deficiencia de Cu en los forrajes puede limitar la utilización del hierro en los animales, dado que el Cu es necesario para transportar el hierro del hígado a la sangre (Suttle, 2010). El exceso de Fe libre en forraje genera efectos citotóxicos por su elevado potencial redox y por su capacidad para generar radicales libres a través de la reacción Haber-Weiss. Cuando las reservas tisulares se hacen excesivas durante una sobrecarga crónica de Fe, existe suficiente Fe reactivo para desencadenar daño oxidativo en zonas como el hígado (Castellano, 2012). El presente estudio señala que las concentraciones de Fe en suero sanguíneo de animales jóvenes (3.44 mg L^{-1}) fueron superiores a las de animales adultos (1.52 mg L^{-1}), de acuerdo con el rango de 1.3 a 2.5 mg L^{-1} señalado por Puls (1988), mostrando

diferencias entre las crías y sus madres ($p<0.01$). Las investigaciones de Kincaid (2000) y McDowell & Arthington (2005), señalan que los animales en pastoreo no presentan deficiencia de Fe por el nivel adecuado de este en los forrajes, sin importar la contaminación del forraje con suelo. Lo anterior coincide con lo observado en el Cuadro 9.

Las concentraciones de Zn en suero sanguíneo se reportan en el Cuadro 9, donde pueden observarse mayores concentraciones de Zn en animales jóvenes que en animales adultos, mostrando diferencia estadística ($p<0.01$). La deficiencia de Zn en los animales adultos podría deberse a que el forraje no cubre el requerimiento mínimo del ganado bovino; aunque niveles bajos de Zn en suelo, plantas y tejidos de animales se han reportado en muchas regiones tropicales del mundo (McDowell & Arthington, 2005).

Las mayores concentraciones de Zn en plasma en los animales jóvenes podrían deberse a que los niveles plasmáticos varían con la edad, el estrés, infecciones y por restricciones alimenticias (Kincaid & Hodgson, 1989). Otro factor que podría influir en los animales jóvenes, es que la leche aporta concentraciones de Zn equivalentes a la del alimento (30 a 40 mg kg^{-1}), siendo cuatro veces superior en el calostro (Underwood & Suttle, 2003). Una dieta completa a base de materias primas vegetales, que además presenta disponibilidad mineral variable, por lo general no cubre los requerimientos de Zn, por lo que es necesario la suplementación (Castellano, 2012).

El estudio de Kincaid (2000) menciona que el Zn sérico se reduce por el estrés hipertérmico, por lo que, deficiencias de Zn pueden causar daños oxidativos al tratarse de uno de los principales componentes de las enzimas antioxidantes, aumentando la producción de radicales libres y disminuye el crecimiento de animales jóvenes, lo cual genera problemas sanitarios asociados a fallas inmunitarias y reproductivas, así como de integridad de la piel y pezuñas. La sintomatología de toxicidad por Zn incluye, disminución del apetito y del crecimiento del animal, llegando a la muerte en los casos de una toxicidad elevada (Underwood & Suttle, 2003).

3.5.5 Calidad del forraje a diferente porcentaje de madurez de las gramíneas

En el Cuadro 10 están los resultados de las variables bromatológicas de las gramíneas a diferentes porcentajes de madurez. Los contenidos de proteína cruda, extracto etéreo, fibra detergente neutro, cenizas y materia orgánica variaron ($p<0.01$) entre los porcentajes de madurez.

Cuadro 10. Porcentajes de proteína cruda, extracto etéreo, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, cenizas, materia seca, materia orgánica de gramíneas cosechadas a diferentes porcentajes de madurez en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Variable	Porcentaje de madurez					EEM ^z	Pr>F
	60	70	80	90	100		
PC	9.98 ^{ab}	11.09 ^a	9.62 ^{ab}	11.76 ^a	6.88 ^b	1.09	<0.01
EE	1.56 ^a	1.36 ^{ab}	1.49 ^a	1.37 ^{ab}	0.65 ^b	0.21	<0.01
FDN	69.11 ^b	73.37 ^b	68.53 ^b	74.44 ^b	83.00 ^a	2.71	<0.01
FDA	47.20 ^a	50.77 ^a	47.38 ^a	55.61 ^a	52.81 ^a	2.94	0.26
C	9.12 ^a	8.16 ^a	8.84 ^a	7.72 ^{ab}	5.74 ^b	0.7	<0.01
MS	93.41 ^a	92.84 ^a	92.98 ^a	92.78 ^a	93.12 ^a	0.25	0.50
MO	84.29 ^b	84.68 ^b	84.13 ^b	85.06 ^{ab}	87.38 ^a	0.74	<0.01

^z EEM = Error estándar de la media.

^{a, b} Las medias en hileras dentro de porcentaje de madurez sin una letra en común, son diferentes ($p<0.05$)

Los valores de proteína obtenidos señalan una fuerte caída al 100% de madurez Ramírez, Herrera, Leonard, Verdecia & Álvarez (2010) y Cevallos et al. (2008) aseguran que la proteína disminuye conforme la planta crece, debido al descenso de la actividad metabólica de los pastos conforme avanza la edad de los rebrotes. La actividad metabólica de la planta es menor a mayor edad de cosecha del forraje, lo cual hace que los valores de PC descendan. Diversos estudios presentan valores promedios de 5.36, 10.80 y 13.60% de PC al aumentar la edad de los pastos (Mantilla, Oviedo Zumaqué & Betancur Hurtado, 2010; Álvarez et al., 2015), esta tendencia es compatible con lo observado en el presente estudio con valores entre 6.88 y 11.76%.

El mayor contenido de extracto etéreo se obtuvo en forrajes al 60% de madurez en comparación con 70, 80, 90 y 100% de madurez ($p<0.01$). En relación con estos resultados Cevallos et al. (2008) coinciden que al incrementarse la edad de los pastos se produce disminución progresiva del valor nutritivo, incluyendo las grasas.

El contenido nutrimental de las pasturas analizadas en sus diferentes estadios de madurez fue similar a los obtenidos por Verdecia (2008) y por Álvarez et al. (2015) donde el contenido de FDN presenta diferencias significativas ($p < 0.01$) para los pastos con porcentajes de madurez de 100, 90 y 70 en comparación con aquellos que tuvieron 80 y 60% de madurez. En cuanto a FDA no se observaron diferencias ($p > 0.05$) por efecto de la edad del forraje. Oba & Allen (1999) establecen que el contenido de FDN en el forraje depende de la especie, la madurez y el ambiente donde se desarrollan éstos. También Mantilla et al. (2010) indicaron que una alta digestibilidad de las paredes celulares (FDN) es indicativo de poco contenido de lignina, ya que, la madurez de las plantas, está relacionada inversamente con la degradabilidad ruminal de los carbohidratos estructurales debido al mayor contenido de celulosa y lignina a medida que se incrementa el intervalo de corte o aprovechamiento del pasto por los animales en condiciones de pastoreo.

Acerca del porcentaje de cenizas, los análisis muestran diferencia ($p < 0.01$) de acuerdo al porcentaje de madurez del forraje. Los valores en el contenido de cenizas decrecieron paulatinamente conforme aumentó el porcentaje de madurez del pasto. Estos datos coinciden con los reportados por Ceballos-Marquez et al. (2010), quienes señalaron que el contenido de cenizas decrece paulatinamente conforme aumenta la edad de los forrajes. No obstante, el contenido de cenizas refleja también el contenido de materia orgánica en el pasto, de modo que, a mayor contenido de MO menor contenido de minerales.

Contrariamente, el contenido de MS del forraje no se alteró conforme aumento el porcentaje de madurez, sin embargo, estos resultados difieren de los reportados por Mantilla et al. (2010). En cuanto al contenido de MO se observaron diferencias significativas ($p < 0.01$) con base en el porcentaje de madurez del forraje, encontrándose porcentajes de MO más altos conforme se incrementó la edad de las gramíneas forrajeras, lo cual concuerda con Mantilla et al. (2010) quienes señalan que al incrementarse la madurez del forraje incrementa la MO.

3.5.6 Efecto de la familia forrajera en la composición nutricional

El Cuadro 11 muestra el contenido de PC en leguminosas fue 6.23 puntos porcentuales mayor al de las gramíneas ($p<0.01$). Sin embargo, el contenido en FDN y FDA fue 26.09 y 12.5% mayor en gramíneas ($p<0.01$) en comparación con las leguminosas. Si bien el balance mineral y su disponibilidad pueden ser mayores en las leguminosas que en las gramíneas, el porcentaje de MS y MO fueron superiores en las gramíneas que en las leguminosas. Inversamente, el porcentaje de cenizas en el forraje fue mayor en las leguminosas.

Cuadro 11. Porcentajes de proteína cruda, extracto etéreo, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, cenizas, materia seca, materia orgánica en leguminosas y gramíneas en la unidad de producción silvopastoril en el estado de Yucatán.

Especie	PC	EE	FDN	FDA	C	MS	MO
Gramíneas	10.45 ^b	2.20 ^a	71.82 ^a	49.76 ^a	8.57 ^a	90.41 ^a	82.80 ^a
Leguminosas	16.68 ^a	2.42 ^a	45.73 ^b	37.2 ^b	8.67 ^a	89.12 ^a	81.39 ^a
EEM	0.96	0.10	3.22	2.24	0.53	0.17	0.58
Pr>F	<0.01	0.86	<0.01	<0.01	0.92	0.79	0.75

^{a, b} Medias de gramíneas y leguminosas sin una letra en común dentro de la misma columna son diferentes ($P>0.05$).

^z EEM = Error estándar de la media.

En el Cuadro 11 se presenta el contenido de PC en leguminosas con un promedio de 16.68%, valor similar a los promedios reportados para *Gymnopodium floribundum* (9.8%), *Phitecellobium albicans* (16.2%), *Leucaena collisii* (17-20%) y *Leucaena leucocephala* (20-32%), especies utilizadas en el presente estudio para determinar el contenido de PC en leguminosas (Trejo, 2016; Ayala-Burgos et al., 2006; Pinto et al., 2014; Benítez et al., 2010). Las especies utilizadas para determinar el contenido de PC en gramíneas fueron *Cynodon nlemfuensis*, *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria híbrida*, mismas especies utilizadas en las investigaciones de Combatt et al. (2008), Tsuzukibashi et al. (2016) y Cuadrado et al. (2005), donde señalan valores de 8.12%, 8.8% y 9.8%, respectivamente, mientras que en el presente estudio el valor promedio de PC para gramíneas fue de 10.45% de PC.

Meléndez & De Dios (2011), señala que el contenido de PC en leguminosas es superior al de las gramíneas en un rango de 5 a 12% de diferencia. García, Wencomo,

González & Medina (2008) y Mejía-Díaz et al. (2017) describen la importancia de establecer leguminosas como forraje por el aporte de PC en comparación con las gramíneas tropicales. Otros estudios señalan mayores porcentajes de PC en gramíneas por efecto de la asociación con leguminosas; mientras que las leguminosas en monocultivo duplicaron el porcentaje de proteína (Maya, Durán & Ararat, 2005 y Quevedo, 2014). El contenido de PC en las gramíneas pudo ser influenciado por la presencia cercana de las leguminosas fijadoras de nitrógeno; el nitrógeno fijado al suelo es aprovechado por las gramíneas, existiendo simbiosis entre gramíneas y leguminosas (Sierra & Nygren, 2006). De acuerdo con lo señalado anteriormente, en el presente estudio hubo diferencias en el contenido de PC entre gramíneas y leguminosas ($p < 0.05$). Esto coincide con lo publicado por Gómez Castro, Nahed Toral, Tewolde, Pinto Ruiz & López Martínez (2006) quienes encontraron mayores porcentajes de proteína en las leguminosas que en las gramíneas. Pezo & Ibrahim (1999) y Chamorro Viveros, Obando & María (2008) señalan que el efecto de sombra proporcionado por las arbóreas en los sistemas silvopastoriles mejora hasta en 5% el contenido proteico de las gramíneas asociadas, sobre todo, en la estación seca del año.

En el Cuadro 11 se da a conocer los valores promedios de EE de gramíneas y leguminosas, no observándose diferencias entre ambas forrajeras para ese nutrimento ($p > 0.05$). Para las gramíneas arriba señaladas (*Cynodon nlemfuensis*, *Brachiaria brizantha* y *Brachiaria híbrida*) los promedios de EE, reportados por Cuadrado et al. (2005), Combatt et al. (2008) y Tsuzukibashi et al. (2016) fueron 1.9, 1.8 y 2.1%, respectivamente, siendo éstos, inferiores a lo encontrado en el presente estudio (2.20%). Otros autores presentan valores promedios de EE en diferentes gramíneas de 1.16 a 3.03% y en leguminosas de 2.7 a 4.75% (Bugarín, Lemus, Sangines, Aguirre, Ramos, Soca & Arece, 2009; Gaviria-Urbe, Naranjo-Ramírez, Bolívar-Vergara & Barahona-Rosales, 2015). El efecto de la época del año, estado de madures y tipo de suelo, influyen en el contenido de lípidos en ambas especies asociadas en los sistemas silvopastoriles (Molina Botero, Cantet, Montoya, Correa Londoño & Barahona Rosales, 2013).

En el caso de FDN y FDA ambas variables presentan diferencias significativas entre gramíneas y leguminosas ($p < 0.01$), obteniendo mayores porcentajes de ambas fibras en las gramíneas que en las leguminosas. Gualdrón & Padilla (2011) coincide con el presente estudio, señalado un mayor contenido de FDA y FDN en gramíneas comparados con las leguminosas ambos asociados en sistemas silvopastoriles. Vázquez & Pérez (2011) sostienen que el estrés hídrico, sin llegar a ser extremo, mejora el valor nutricional del forraje en 9%, con relación al contenido de PC y de FDN. Otro factor que puede incrementar los porcentajes de FDA Y FDN es la edad del forraje, relacionado con los cambios fisiológicos que ocurren al envejecer la planta: provocando la disminución del contenido celular citoplasmático, reducción del lumen celular con sus componentes solubles, y el incremento de los componentes fibrosos (Nogueira, 1995).

En el Cuadro 11 se observa que no hubo diferencias ($p > 0.05$) entre especies para cenizas (C), materia orgánica (MO) y materia seca (MS). Esto coincide con lo reportado por Bugarín et al. (2009) y Gaviria et al. (2015) al no encontrar diferencias significativas en estos componentes de calidad nutrimental de los forrajes. Romero, García & López (2000) indica contenidos mayores de MS en gramíneas por efecto de la edad de la planta y a la época del año, en comparación con las leguminosas; mientras que Ramírez et al. (2010) señalan que la digestibilidad de la MS y la MO disminuyen con la edad del rebrote. Por lo tanto, el porcentaje de MS, C y MO, están determinados por el tipo de planta y edad de corte.

3.6 Conclusiones

Existe deficiencia de fósforo en los suelos de la unidad de producción, teniendo excesos de calcio, hierro y potasio por arriba de los máximos tolerables.

Las leguminosas tuvieron una mayor concentración de proteína cruda, extracto etéreo y cenizas, pero menores concentraciones en fibra detergente neutro, fibra detergente ácido y materia orgánica que las gramíneas.

Las gramíneas y leguminosas fueron deficientes en magnesio, cobre y zinc, mientras las gramíneas también fueron en sodio y fosforo; teniendo la mejor calidad del forraje a 90% en relación al 60 y 70% de madurez.

Existen deficiencias de cobre y magnesio y en menor grado de zinc en los animales de la unidad silvopastoril. El fósforo es un elemento crítico porque esta deficiente en suelo, gramíneas y en animales adultos.

3.7 Literatura citada

- Alloway, B. J. (1995). Soil processes and the behavior of metals. *In: Heavy metals in soils*. (B. J. Alloway, Ed.). Blackie A. & P. London, United Kingdom. 11-37.
- Alloway, B. J. 2008. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second Edition. International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association. Belgium and France. 139.
- Álvarez, A. E. B., Hidrovo, C. A. M., Moreno, E. O. T., Cevallos, J. H. A., Ferrín, L. M. C., & Galeas, M. M. P. (2015). Composición química y degradación de cuatro especies de *Pennisetum sp.* *Ciencia y Tecnología*, 8(2), 13-27.
- AOAC. (2000). Métodos Oficiales de Análisis de la AOAC. *Internacional Gaithersburg*, MD, EE.UU. (17).
- Arévalo, L. A. P., & Rivera, J. J. C. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 81: 18-32.
- Ayala-Burgos, A. J., Capetillo L. C. M., Cetina G. R. H., Zapata C. C., & Sandoval C. A. A. (2006). Composición química-nutricional de árboles forrajeros: Compilación de análisis del laboratorio de nutrición animal. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yuc. México. 60 p.
- Barahona, R., Sánchez, M. S., Murgueitio, E., & Chará, J. (2014). Contribución de la *Leucaena leucocephala* Lam (de Wit) a la oferta y digestibilidad de nutrientes y las emisiones de metano entérico en bovinos pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos. *Premio Nacional de Ganadería José Raimundo Sojo Zambrano, modalidad Investigación Científica. Revista Carta Fedegán*, 140, 66-69.
- Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. (2015). *Handbook of Plant Nutrition*. 2th ed. CRC press. Taylor and Francis Group. 746.
- Bautista-Zúñiga, F., Garcia, J., & Mizrahi, A. (2005). Diagnóstico campesino de la situación agrícola en Hocabá, Yucatán. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 571-580.
- Beede, D. K. (2005). Assessment of water quality and nutrition for dairy cattle. In *Proc. Mid-south Ruminant Nutrition Conf.* 1-19.
- Beede, D. K. (2012). What will our ruminants drink? *Animal Frontiers*, 2(2), 36-43.
- Benítez B., Y., A. Bernal H., E. Cortés D., G. Vera C., & F. Carrillo A. (2010). Producción de forraje de guaje (*Leucaena spp.*) asociado con zacate (*Brachiaria brizantha*) para ovejas en pastoreo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1(3), 397-411.
- Bores, Q. R., & Castellanos, R. A. (2003). Importancia de los minerales en la alimentación de los rumiantes en Yucatán. *Publicación Técnica. Inst. Nal. de Invest. Agric. Forestales y Pecuarias-CONACyT-SISIERRA. Mayo. Mérida, Yuc.*

- Bugarín, J., Lemus, C., Sangines, L., Aguirre, J., Ramos, A., Soca, M., & Arece, J. (2009). Evaluación de dos especies de *Leucaena*, asociadas a *Brachiaria brizantha* y *Clitoria ternatea* en un sistema silvopastoril de Nayarit, México: II. Producción y composición bromatológica de la biomasa. *Pastos y Forrajes*, 32(4), 1-9.
- Cabrera Torres, E. J., Sosa Rubio, E. E., Castellanos Ruelas, A. F., Gutiérrez Baeza, Á. O., & Ramírez Silva, J. H. (2009). Comparación de la concentración mineral en forrajes y suelos de zonas ganaderas del estado de Quintana Roo, México. *Veterinaria México*, 40(2), 167-179.
- Carulla, J., Cárdenas, E., Sánchez, N., & Riveros, C. (2004). Valor nutricional de los forrajes más usados en los sistemas de producción lechera especializada de la zona andina colombiana. *Seminario Nacional de Lechería Especializada: "Bases Nutricionales y su Impacto en la Productividad"*. Medellín, septiembre, 1, 21-38.
- Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas agrícolas, plantas y ECP. Instituto de capacitación para la productividad agrícola. Celaya, Guanajuato, México.
- Castellano, R. (2012). Utilización de minerales y otros nutrientes en el lechón ibérico sometido a distinto manejo nutricional durante la lactancia. (Doctoral dissertation, Universidad de Granada). 2-176
- Ceballos-Marquez, A., Barkema, H. W., Stryhn, H., Wichtel, J. J., Neumann, J., Mella, A., & Wittwer, F. (2010). The effect of selenium supplementation before calving on early-lactation udder health in pastured dairy heifers. *Journal of Dairy Science*, 93(10), 4602-4612.
- Cevallos, J. H. A., Garaicoa, D. R., Mendoza, E. P., Guerra, I. E., Valdez, O. D. M., Murillo, R. L., & Ruiz, J. V. (2008). Comportamiento agronómico y composición química de tres variedades de *Brachiaria* en diferentes edades de cosecha. *Ciencia y Tecnología*, 1(2), 87-94.
- Chamorro Viveros, D. R., Obando, R., & María, A. (2008). El componente arbóreo como dinamizador del sistema de producción de leche en el trópico alto colombiano: experiencias de Corpoica-Tibaitatá (No. Doc. 20677) CO-BAC, Bogotá).
- Charlton, J. A., & Armstrong, D. G. (1989). The effect of an intravenous infusion of aldosterone upon magnesium metabolism in the sheep. *Experimental Physiology*, 74(3), 329-337.
- Combatt, E., Jarra, A., & Maza, I. (2008). Growth of *brachiaria decumbens* stapf and *cynodon nlemfuensis vanderyst* in acid sulphate soils of Córdoba. *Revista MVZ Córdoba*, 13(2), 1380-1392.
- Cuadrado, H., Torregroza, L., & Garcés, J. (2005). Producción de carne con machos de ceba en pastoreo de pasto híbrido mulato y *Brachiaria decumbens* en el valle del Sinú. *Revista MVZ Córdoba*, 10(1), 573-580.
- Cuartas Cardona, C. A., Naranjo Ramírez, J. F., Tarazona Morales, A. M., Murgueitio Restrepo, E., Chará Orozco, J. D., Ku Vera, J., & Barahona Rosales, R. (2014). Contribution of intensive silvopastoral systems to animal performance and to adaptation and mitigation of climate change. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 27(2), 76-94.

- Edmeades, D. C., & O'Connor, M. B. (2003). Sodium requirements for temperate pastures in New Zealand: a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 46(1), 37-47.
- Fick, K. R. (1976). Métodos de análisis de minerales para tejidos de plantas y animales (No. QP 88. M4718). 358.
- García M. D., G. H. Wencomo, C. M. González, & R. M. Medina, O. L. Cova. (2008). Caracterización de diez cultivares forrajeros de *Leucaena leucocephala* basada en la composición química y la degradabilidad ruminal. *Revista MVZ Córdoba* 13(2), 1294-1303.
- 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(245), 21-27.
- Goff, J. P. (2008). The monitoring, prevention, and treatment of milk fever and subclinical hypocalcemia in dairy cows. *The Veterinary Journal*, 176(1), 50-57.
- Gómez Castro, H., Nahed Toral, J., Tewolde, A., Pinto Ruiz, R., & López Martínez, J. (2006). Áreas con potencial para el establecimiento de árboles forrajeros en el centro de Chiapas. *Técnica Pecuaria en México*, 44(2), 219-230.
- Gualdrón, C. E., & Padilla, C. C. E. (2011). Producción y calidad de leche en vacas Holstein en dos arreglos silvopastoriles de *Acacia decurrens* y *Alnus acuminata* asociadas con pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Tesis profesional. Facultad de Zootecnia de la Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.
- Harris, L. E. (1970). Métodos para el análisis químico y la evaluación biológica de alimentos para animales. *Center for Tropical Agriculture, Feed Composition Project*, University of Florida. 183.
- Herlin, A. H., & Andersson, I. (1996). Soil ingestion in farm animals. *Department of Agricultural Biosystems and Technology*, Swedish University of Agricultural Sciences. JBT. Rapport 105. 36.
- Hopkins, B., & Ellsworth, J. (2005). Phosphorus availability with alkaline/calcareous soil. In *Western Nutrient Management Conference*, 6, 88-93.
- Hove, K. (1986). Cyclic changes in plasma calcium and the calcium homeostatic endocrine system of the postparturient dairy cow. *Journal of Dairy Science*, 69(8), 2072-2082.
- Hutcheson, D. P., Cole, N. A., & McLaren, J. B. (1984). Effects of pretransit diets and post-transit potassium levels for feeder Calves 1. *Journal of Animal Science*, 58(3), 700-708.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). Elementos traza en suelos y plantas. 238- 340-
- Kincaid, R. L. (2000). Assessment of trace mineral status of ruminants: A review. *Journal of Animal Science*, 77(E-Suppl), 1-10.
- Kincaid, R. L., & Hodgson, A. S. (1989). Relationship of selenium concentrations in blood of calves to blood selenium of the dam and supplemental selenium. *Journal of Dairy Science* 72: 259-263.

- Mantilla, C., Oviedo Zumaqué, L. E., & Betancur Hurtado, C. A. (2010). Efecto de la época de corte sobre la composición química y degradabilidad ruminal del pasto *Dichanthium aristatum* (Angleton). *Zootecnia Tropical*, 28(2), 275-282.
- Manera, D. B., Voltolini, T. V., Menezes, D. R., & de Araújo, G. G. L. (2016). Chemical Composition of Drilled Wells Water for Ruminants. *Journal of Agricultural Science*, 8(12), 127-137.
- Martínez C., E. (2006). Diagnóstico y suplementación mineral de ganado bovino en condiciones tropicales. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo. 125.
- Maya, G. E., Durán, C. V., & Ararat, J. E. (2005). Valor nutritivo del pasto estrella solo y en asociación con leucaena a diferentes edades de corte durante el año. *Acta Agronómica*, 54(4), 41-46.
- Mejía-Díaz, E., Mahecha-Ledesma, L., & Angulo-Arizala, J. (2017). *Tithonia diversifolia*: especie para ramoneo en sistemas silvopastoriles y métodos para estimar su consumo. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 289-302.
- McDonald, I. W. (1986). The nutrition of the grazing ruminant. *Nutrition Abstract and Reviews* 38, 381-395.
- McDowell, L. R. (1985). Nutrition of Grazing Ruminants in Warm Climates. *Academic Press*, FL. 443.
- McDowell, L., Velásquez, P., Valle, G. (1997). Deficiencias y toxicidades y su efecto en la producción de rumiantes en el trópico. Universidad de Florida. Departamento de Zootecnia. (3), 86.
- McDowell, L. R. (2003). Minerals in Animal and Human Nutrition. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science. 644.
- McDowell, L. R., & J. D. Arthington. (2005). Minerales para Rumiantes en Pastoreo en Regiones Tropicales. Cuarta edición. Universidad de Florida. Gainesville, Florida. USA. 94.
- Meléndez, N. F. & L. G. De Dios. (2011). Fertilización de praderas tropicales. En: Pérez, P. J., G. J. Vázquez y N. F. Meléndez. Fertilidad de suelos para praderas tropicales. Fundación Produce A. C. Chiapas. 307-344.
- Millan, Cortes, H., & Aguirre García, M. (1990). Perfil mineral del pasto guinea en el oriente. *Veterinaria México (México)*. 21, 4: 399-402.
- Minson, D. J. (1990). Cooper. In: Forage in Ruminant Nutrition. Academic Press, Sydney. 316-324
- Molina Botero, I. C., Cantet, J. M., Montoya, S., Correa Londoño, G. A., & Barahona Rosales, R. (2013). Producción de metano *in vitro* de dos gramíneas tropicales solas y mezcladas con *Leucaena leucocephala* o *Gliricidia sepium*. *Revista CES* 8, 15-31.
- Mortvedt, J. J. (2000). Bioavailability of micronutrients. En: Handbook of Soil Science. Press. FL. 71-88.
- Muñoz-González, J. C., Huerta-Bravo, M., Lara-Bueno, A., Rangel-Santos, R., & de la Rosa-Arana, J. L. (2016). Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del

Trópico Húmedo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 16(Esp), 3315-3327.

- NADIS (National Animal Disease Information Service). 2012. Trace Element Deficiencies in Sheep. Disponible en: <http://www.nadis.org.uk/bulletins/trace-element-deficiencies-in-sheep.aspx>. Consultado el 14 marzo de 2018.
- Nogueira, F. J. C. M. (1995). Estudo da degradabilidade *in situ* e de protozoários ciliados com zebuínos da raça Nelore (*Bos taurus indicus*) e búfalos (*Bubalus bubalis*) submetidos a dietas com volumosos e concentrados. Tese Livre Docência. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil. 144.
- NRC (National Research Council). (2001). Nutrient Requirements of Dairy Cattle. National Academies Press. 360 p.
- NRC (National Research Council). (2005). Mineral Tolerance of Animals. National Academies Press. 496 p.
- De Castro, M. L., & Garcia-Ayuso, L. E. (1998). Soxhlet extraction of solid materials: an outdated technique with a promising innovative future. *Analytica chimica acta*, 369(1-2), 1-10.
- Nyambaka, H. N., Shisia, K. S., Ngure, V., & Oduor, F. D. O. (2013). Effect of pH and forage species on mineral concentrations in cattle breeds in major grazing areas of Uasin Gishu County, Kenya. *International Journal Current Microbiology and Applied Sciences* 2(12), 247-254
- Oba, M., & Allen, M. S. (1999). Evaluation of the importance of the digestibility of neutral detergent fiber from forage: effects on dry matter intake and milk yield of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 82(3), 589-596.
- Olmos, R. R., Marqués, R. S., & Moreto, F. V. (2003). El agua en el medio ambiente: muestreo y análisis. Plaza y Valdes. 210.
- Pedroso, R., & Roller, F. (2009). Efectos de las deficiencias de cobre en la reproducción y eficacia de las nuevas biotecnologías del ganado bovino en Cuba. Reseña. *Revista Cubana de Ciencia y Tecnología Ganadera*, 3(39), 101-119.
- Penning, P. D. (2004). Animal-based techniques for estimating herbage intake. In: Penning, P. D. (Ed.). *Herbage Intake Handbook*. 2th ed. Reading: *The British Grassland Society*, pp 53-93.
- Pérez, J. O., Guillén, R. J., Hernández, S. R., & Hernández, P. A. M. (2005). Uso de las leguminosas arbustivas en los sistemas de producción animal en el trópico. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 6(5), 1-19.
- Perkin-Elmer. (1996). Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy. 300 p.
- Pezo, D., & Ibrahim, M. (1999). Sistemas Silvopastoriles (No. 2). CATIE. 276 p.
- Pinto, R., Medina, F., Gómez, H., Guevara, F., & Ley, A. (2014). Caracterización nutricional y forrajera de *Leucaena collinsii* a diferentes edades de corte en el trópico seco del sur de México. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 31(1), 78-99.

- Puls, R. (1988). Mineral Levels in Animal Health. Diagnostic Data. *Ed. Sherpa International*. Canada. 154.
- Quevedo, P, M. (2014). Efecto de un sistema silvopastoril sobre la calidad de la leche, comparado con un sistema de producción convencional (Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira).
- Quinteros, R., Barbona, I., Vargas, J. C., Moyano, J. C., & Marini, P. R. (2017). Macrominerales en sangre en cuatro genotipos bovinos en la amazonía ecuatoriana. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 28(4), 802-811.
- Ramírez, J. L., Herrera, R. S., Leonard, I., Verdecia, D., & Álvarez, Y. (2010). Rendimiento de materia seca y calidad nutritiva del pasto *Brachiaria brizantha* x *Brachairia ruziziensis* vc. Mulato en el Valle del Cauto, Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 44(1), 65-72.
- Rhue, R. D., & Kidder, G. (1983). Analytical procedures used by the IFAS extension soil testing laboratory and the interpretation of the results. *Gainesville Soil Science. Dept., University of Florida*.
- Restrepo, E. M., Rosales, R. B., Estrada, M. X. F., Orozco, J. D. C., & Herrera, J. E. R. (2016). Es posible enfrentar el cambio climático y producir más leche y carne con sistemas silvopastoriles intensivos. *Ceiba*, 54(1), 23-30.
- Roca, N., Pazos, M. S., & Bech, J. (2007). Disponibilidad de cobre, hierro, manganeso, zinc en suelos del NO argentino. *Ciencia del Suelo*, 25(1), 31-42.
- Romero, L. C. E., García, P. J. M., & López, J. (2000). Influencia del pastoreo en la concentración de fenoles totales y taninos condensados en *Gliricidia sepium* en el trópico seco. *Livestock Research for Rural Development*, 4(12), 1-9.
- Rosa, D. E., Fazzio, L. E., Picco, S. J., Furnus, C., & Mattioli, G. A. (2008). Metabolismo y deficiencia de zinc en bovinos. *Analecta Veterinaria*, 28.
- Rosas, A. C. A., & Moreno, J. R. (2015). Macrominerales en pasturas y suero sanguíneo de bovinos en estancias de la provincia Cercado, estación lluviosa, Beni Bolivia 2009-2010. *Revista Científica Agrociencias Amazonía*, 5, 29-37.
- Sánchez, J. M., & Goff, J. P. (2006). Strategies for controlling hypocalcemia in dairy cows in confinement and pasture settings. In: *Proceedings of the International Conference on Production Diseases in Farm Animals*. 12th International Conference on Production Diseases in Farm Animals, East Lansing, Michigan. 182-187.
- Sánchez, J. M., & Saborío-Montero, A. (2014). Hypocalcemia and hipomagnesemia in a Holstein, Jersey and Guernsey grazing herd. *Agronomía Costarricense*, 38(2), 55-65.
- SAS Institute Inc, 2016. SAS® 9.4 Statements: Reference, Fifth Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Sierra, J., & Nygren, P. (2006). Transfer of N fixed by a legume tree to the associated grass in a tropical silvopastoral system. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1893-1903.
- Socha M.T., Ensley S.M., Tomlinson D.J. & Johnson A.B. (2002). Variability of water composition and potential impact on animal performance. In *Dairy Cattle Nutrition Workshop, Grantville, Pennsylvania*. Springer Verlag, Amsterdam, 109-132.

- Sosa, R. E. E., Cabrera, E. E. T., & Pérez, R. D. (2006). Evaluación del potencial forrajero de gramíneas y leguminosas introducidas, bajo diferentes frecuencias de corte. *Trópico Rural FUQROOP*, 1(5), 1-8.
- Shorrocks, V. M., & Alloway, B. J. (1986). Copper in plant, Animal and Human Nutrition. *Copper Development Association*, Report TN 35. Orchard House, London United Kingdom. 84 p.
- Suttle, N. F. (2010). Mineral Nutrition of Livestock. CABI. 4^a ed. 565 p.
- Trejo, A., (2016). Comportamiento productivo de ovinos en un sistema silvopastoril de *Leucaena Leucocephala* asociado a *Megathrsus maximus* var. Mombasa versus agostadero. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. 30-48.
- Tsuzukibashi, D., Costa, J. P., Moro, F. V., Ruggieri, A. C., & Malheiros, E. B. (2016). Anatomía cuantitativa, digestibilidad *in vitro* y composición química de cultivares de *Brachiaria brizantha*. *Journal of Agricultural Science*, 39(1), 46-53.
- Underwood, E. J., & Suttle, N. F. (2003). Los minerales en la Nutrición del Ganado 3a ed. Acribia. Zaragoza. pp: 6.
- Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597.
- Vázquez, G. J., & Pérez P. J. (2011). Fertilidad de Suelos para Praderas Tropicales. *Fundación Produce Chiapas*. Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas. 437.
- Vázquez, A. J. F., Rojo, R. R., García, R. M., López, D., Salem, A. F., Domínguez, V. I. A., Pescador, N., & Tinoco, L. 2011. Effect of season on serum Cu and Zn concentrations in crossbred goats having different reproductive status under semiarid rangeland conditions in southern Mexico State. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 331-335.
- Verdecia, D. M. (2008). Rendimiento y componentes del valor nutritivo del *Panicum maximum* cv. Tanzania (Yiel and component of the. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 9(5), 1-9.
- Vivas-May, E. F., Rosado Rubio, J. G., Castellanos Ruelas, A. F., Heredia y Aguilar, M., & Cabrera-Torres, E. J. (2011). Contenido mineral de forrajes en predios de ovinocultores del estado de Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 2(4), 465-475.
- Whitehead, D. C. (2000). Nutrient Elements in Grassland: soil-plant-animal relationships. CABI.