



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHINÁ

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN AGRONOMÍA

PRESENTA:
ERIK VALENZUELA VILLAZANA

ASESOR INTERNO:
DR. BERNARDINO CANDELARIA MARTINEZ

TÍTULO:
**EFFECTO DE DOS ARREGLOS SILVOPASTORILES EN LA CALIDAD QUÍMICA DEL
PASTO Y DEL SUELO EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE.**

2025





TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHINÁ

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN AGRONOMÍA

PRESENTA:
ERIK VALENZUELA VILLAZANA

ASESOR INTERNO:
DR. BERNARDINO CANDELARIA MARTINEZ

TÍTULO:
**EFFECTO DE DOS ARREGLOS SILVOPASTORILES EN LA CALIDAD QUÍMICA DEL
PASTO Y DEL SUELO EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE.**

JUNIO/2025





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Chiná
Dirección

Chiná, Campeche; 02/junio/2025
Oficio No. DIR/533/2025

**C. VALENZUELA VILLAZANA ERIK
PRESENTE**

El que suscribe, manifiesta que el Dictamen emitido por el Comité de Revisión que integra el sínodo de la Titulación Integral por Tesis denominada **"EFECTO DE DOS ARREGLOS SILVOPASTORILES EN LA CALIDAD QUÍMICA DEL PASTO Y DEL SUELO EN ESCÁRCEGA, CAMPECHE."**; es **APROBADO** como requisito parcial para obtener el Título de Ingeniero Agrónomo.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Aprender Produciendo

**MARCO GABRIEL ROSADO ÁVILA
DIRECTOR**

Minutario
MGRA/scbn



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Calle 11 S/N entre 22 y 28, Chiná,
Campeche, C.P. 24520, Tel. 9818272052 y
9818272082, e-mail: dir_china@tecnm.mx
www.itchina.edu.mx

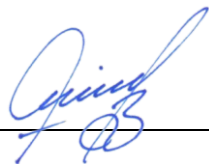


COMITÉ REVISOR

Este trabajo fue revisado y aprobado por este comité y presentado por el
C. **VALENZUELA VILLAZANA ERIK** como requisito parcial para obtener el título de:
INGENIERO AGRÓNOMO el día 17 del mes de junio del año 2025 en Chiná, Campeche.

BERNARDINO CANDELARIA MARTINEZ

Presidente



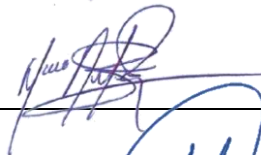
SILVIA FRAIRE CORDERO

Secretario



MARCO ANTONIO RAMIREZ BAUTISTA

Vocal



RICARDO ANTONIO CHIQUINI MEDINA

Vocal Suplente



AGRADECIMIENTOS

A Dios, que me permitió llegar hasta este punto con buena salud, dándome inteligencia y sabiduría, guiándome por el buen camino.

Al Instituto Tecnológico de Chiná, por las enseñanzas impartidas durante mi estadía.

Al Colegio de Postgraduados Campus Campeche por las facilidades brindadas para la realización de esta investigación.

A mi familia, quienes estuvieron conmigo desde el inicio de la carrera, me apoyaron emocional y económicamente haciendo sacrificios para que pudiera llegar hasta aquí.

A mis asesores: al Dr. Bernardino Candelaria Martínez, por su apoyo durante esta investigación, y a la Dra. Silvia Fraire Cordero, quien no solo me brindó su apoyo, sino que también compartió sus experiencias y enseñanzas, otorgándome la oportunidad de enriquecerme con nuevas vivencias al desarrollar este proyecto.

A los propietarios de los ranchos la “Los Robles” y “La Lupita” en Escárcega, Campeche por el acceso a sus unidades productivas.

A mis compañeros de escuela por los momentos vividos durante mi formación académica, en especial a Camilo Alonzo Gutiérrez Chávez y Francisco Javier Reyes Sánchez quienes me motivaron a diario para culminar mi carrera, compartiendo buenos momentos y forjando buenos lazos de amistad.

DEDICATORIA

A cada uno de mis seres queridos que han sido los pilares para seguir adelante.

A mis padres Eli Valenzuela Martínez y Virginia Villazana Santillana por ser mi orgullo y motivación.

A mi abuelo José Reyes Valenzuela y mi hermano Isaac Valenzuela por siempre confiar en mí.

Al Dr. Bernardino Candelaria por su apoyo y guía.

A la Dra. Silvia Fraire, por compartir sus conocimientos, brindarme su apoyo y ser una pieza clave para la culminación de esta etapa.

A mis amigos, por los buenos momentos compartidos.

RESUMEN

En Campeche, las prácticas ganaderas intensivas causan degradación del suelo y reducen la calidad del forraje. Para reducir este impacto, se promueve la implementación de sistemas silvopastoriles, los cuales suelen mejorar la calidad del suelo y la productividad ganadera. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar la calidad química del pasto y suelo de dos arreglos silvopastoriles en Escárcega, Campeche. Para ello, se tomaron muestras compuestas de suelo, de pasto y características subjetivas de degradación del pastizal, en una unidad ganadera con disposición de árboles forrajeros en un arreglo disperso (AD) y con arreglo en banco de proteínas (BP), ubicadas en Escárcega, Campeche. Las muestras se secaron, tamizaron y molieron según correspondió para su análisis fisicoquímico. Las características de respuesta para el pasto fueron: color, presencia de materia muerta, arvenses y suelo desnudo (%), producción de forraje verde ($T\ ha^{-1}$), proteína cruda (%) y fibra cruda (%). Para el suelo fueron, textura y nitrógeno total (%). El color del pasto fue verde claro (70 %), el BP presentó mayor materia muerta (30 %) y menor arvenses y suelo desnudo ($<10\%$). La producción de forraje verde ($14.98 \pm 1.26\ T\ ha^{-1}$, AD y $17.08 \pm 1.28\ T\ ha^{-1}$, BP) y la proteína cruda (6.79 %, AD y 5.74 %, BP) fue similar ($p > 0.05$) entre los dos arreglos. La fibra cruda fue más alta ($p < 0.05$) (34.70 %) en AD que en BP (30.73 %). La clase textural del suelo fue arcillosa en ambos sitios, con un contenido de nitrógeno mayor ($p < 0.05$) para el BP (0.54 %) en comparación con AD (0.41 %). En conclusión, bajo las condiciones de este estudio, el banco de proteína en el sistema silvopastoril mejora el contenido de nitrógeno total en el suelo, sin traducirse en un incremento significativo en la producción de forraje verde y proteína cruda del pasto. Sin embargo, la implementación de sistemas silvopastoriles sigue siendo una estrategia prometedora para mejorar la fertilidad del suelo y la calidad del forraje, mitigando el impacto ambiental de las prácticas ganaderas tradicionales y promoviendo una ganadería más sostenible en la región.

Palabras clave: fisicoquímica de suelo, bromatológico, proteína cruda, gramínea

INDICE

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
RESUMEN.....	VI
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
III. HIPÓTESIS	3
IV. JUSTIFICACIÓN	4
V. REVISIÓN DE LITERATURA	6
5.1 Importancia de la ganadería en México	6
5.2 Impacto ambiental de la ganadería	7
5.2.1 Degradación del suelo	7
5.2.2 Degradación de praderas.....	9
5.2.3 Emisión de gases de efecto invernadero	11
5.2.4 Huella hídrica.....	13
5.3 Sistemas silvopastoriles	15
5.3.1 Arreglos silvopastoriles	16
5.3.2 Relación suelo-planta-animal.....	17
5.3.3 Indicadores químicos del suelo	20
5.3.4 Indicadores químicos del pasto.....	21
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	23
6.1 Localización.....	23
6.2 Arreglos silvopastoriles.....	23
6.3 Encuesta	24
6.4 Muestras y análisis de pasto	24
6.5 Muestras y análisis de suelo	27
6.6 Variables	27
6.7 Análisis estadístico	28
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29

7.1	Descripción de la unidad de producción.....	29
7.1.1.	La Lupita	29
7.1.2.	Los Robles	30
7.2	Pasto.....	31
7.2.1.	Color, presencia de materia muerta, arvenses y suelo desnudo	31
7.2.2.	Producción de forraje verde	33
7.2.3.	Proteína cruda.....	35
7.2.4.	Fibra cruda	37
7.3	Suelo.....	39
7.3.1.	Textura	39
7.3.2.	Nitrógeno total	41
VIII.	CONCLUSIONES.....	43
IX.	RECOMENDACIONES	44
X.	LITERATURA CITADA.....	45

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Necesidades de minerales de bovinos en pastoreo en regiones tropicales (mg kg ⁻¹).....	22
Cuadro 2. Descripción cualitativa y cuantitativa de los cuatro niveles de degradación de pasturas.....	25
Cuadro 3. Porcentajes de materia muerta, arvenses y suelo desnudo en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche	32
Cuadro 4. Producción de forraje verde en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche.....	33
Cuadro 5. Proteína cruda (%) de pasto en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche.....	35
Cuadro 6. Fibra cruda (%) de pasto en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche	37
Cuadro 7. Textura y proporciones de los componentes arena, limo y arcilla de suelos en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche	39
Cuadro 8. Nitrógeno total de suelo en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Relación de los elementos suelo-planta-animal	18
Figura 2.	Localización de las comunidades de Adolfo López Mateos y Silvituc, Escárcega, Campeche	23
Figura 3.	Ejemplo representativo del área y distribución de puntos de muestreo de pasto en arreglos silvopastoriles de Escárcega, Campeche.....	25

I. INTRODUCCIÓN

La producción agropecuaria es una de las principales actividades humanas que contribuyen al calentamiento global debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, con incrementos anuales en los niveles de CO₂ que afectan directamente el clima (Gutiérrez *et al.*, 2022).

Esta situación ha generado la necesidad de desarrollar estrategias de manejo sostenible que mitiguen el daño al ecosistema. Entre estas estrategias destaca la implementación de sistemas silvopastoriles (SSP), que integra ganadería y agricultura de manera recíproca, promoviendo el desarrollo productivo del suelo, mejorando el pastoreo y la condición corporal del ganado (Silva y Jaramillo, 2022). Los sistemas silvopastoriles, como parte de la agroforestería, permiten la interacción entre árboles y pasturas para la alimentación animal, bajo un manejo integral que busca hacer de la producción bovina una actividad más moderna, rentable y de mayor calidad, además de fomentar la biodiversidad (Patiño *et al.*, 2021).

La adopción de sistemas silvopastoriles ha sido reconocida como una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad de la producción ganadera, especialmente en regiones tropicales. Estos sistemas no solo integran la producción animal con la conservación ambiental, sino que también contribuyen a mejorar el valor nutricional del forraje y la fertilidad del suelo. Investigaciones previas han demostrado que los SSP favorecen la biodiversidad y la salud del ecosistema, al promover la interacción entre los componentes arbóreos y los pastizales, mejorando así la productividad del suelo y el rendimiento del ganado (Murgueitio *et al.*, 2015).

En regiones tropicales como Campeche, México, donde las prácticas ganaderas intensivas han causado degradación del suelo y una reducción en la calidad del forraje, es crucial encontrar soluciones sostenibles. Los sistemas silvopastoriles han mostrado su potencial para incrementar la disponibilidad de nutrientes en el suelo, como nitrógeno y fósforo, esenciales para el crecimiento del pasto y, por ende, para la salud del ganado

(Ibrahim *et al.*, 2010). Además, la inclusión de árboles en estos sistemas contribuye a la mejora del microclima y a la captura de carbono, lo que refuerza su papel en la mitigación del cambio climático (Duarte *et al.*, 2021).

Esta investigación tiene como objetivo evaluar la calidad química del pasto y del suelo en dos arreglos silvopastoriles en Escárcega, Campeche, México, lo que permitirá identificar las características y los beneficios potenciales de estos sistemas en términos de productividad y sostenibilidad.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el valor químico de pastos y suelo en dos arreglos silvopastoriles en Escárcega, Campeche, México

2.2. Objetivos específicos

Determinar el valor nutricional (fibra y proteína cruda) del pasto en un sistema silvopastoril con arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche, México.

Determinar características físico (textura) y químico (nitrógeno total) del suelo en un sistema silvopastoril con arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche, México.

III. HIPÓTESIS

El valor nutricional del pasto y la calidad fisicoquímica del suelo será mayor en el sistema productivo con un arreglo en forma de banco de proteína por la presencia de un mayor número de árboles por superficie, debido a los beneficios ecológicos que genera la presencia de estos.

IV. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el sector pecuario aumenta día tras día en el mundo, teniendo una velocidad desacelerada, estimando que las actividades ganaderas contribuyen con el 18% del total de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, siendo los impactos en detrimento y contaminación del agua, suelo y el ambiente en general (Corral *et al.*, 2021).

En especial, los sistemas de producción animal en el trópico, tradicionalmente basados en el uso de gramíneas forrajeras en monocultivos, presentan desafíos importantes debido a su bajo valor nutritivo y a la disponibilidad irregular de pastos, producto de la estacionalidad de las precipitaciones y las fluctuaciones de temperatura. Estas limitaciones han contribuido a la degradación de las pasturas y a la baja sostenibilidad de los sistemas ganaderos. Frente a estos problemas, los sistemas silvopastoriles en sus diferentes modalidades emergen como una estrategia clave para integrar árboles y arbustos en la producción ganadera, promoviendo la biodiversidad, mejorando la calidad fisicoquímica y biológica del suelo, además de conservar fuentes de agua (Murgueitio *et al.*, 2015).

Los sistemas silvopastoriles no solo ayudan a revertir la degradación de los pastizales mediante la protección del suelo, sino que también contribuyen a la recuperación de la fertilidad a través de la fijación de nitrógeno por leguminosas y el reciclaje de nutrientes gracias a la intervención de árboles de raíces profundas (Duarte *et al.*, 2021). Esta interacción entre componentes arbóreos y pastizales crea un entorno productivo más equilibrado y resiliente, lo que es particularmente beneficioso.

En el estado de Campeche, México, los sistemas silvopastoriles representan una alternativa prometedora frente a la degradación de suelos y la disminución de la calidad del forraje. Sin embargo, aún es limitada la información sobre el valor nutricional del pasto en estos sistemas y su relación con la fertilidad del suelo en diferentes arreglos silvopastoriles. La comprensión de estas interacciones es fundamental para optimizar las prácticas de manejo, incrementar la rentabilidad de la producción ganadera y reducir los

efectos negativos en el medio ambiente. Además, al ofrecer datos locales, este estudio proporcionará una base científica para la toma de decisiones por parte de los productores y las autoridades, apoyando una transición hacia una ganadería más sostenible.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1 Importancia de la ganadería en México

La ganadería en México es una de las actividades económicas más relevantes, ya que no solo provee alimentos esenciales para la población, sino que también contribuye al desarrollo económico del país. La cría de bovinos, ovinos, porcinos, equinos y aves produce carne, leche y huevo, los cuales son alimentos de alto valor nutritivo y se consumen en grandes cantidades en todo el territorio nacional (SADER, 2019). Estos productos de origen animal son ricos en proteínas, ácidos grasos y micronutrientes esenciales como hierro, zinc y vitaminas del complejo B, contribuyendo de manera significativa a una dieta equilibrada y saludable para la población.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2022), el consumo adecuado de estos nutrientes es clave para alcanzar los objetivos de nutrición aprobados por la Asamblea Mundial de la Salud para 2025, así como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Estos objetivos incluyen la reducción del retraso en el crecimiento entre los niños menores de cinco años, la disminución del bajo peso al nacer, la lucha contra la anemia en mujeres en edad reproductiva, y la reducción del sobrepeso y la obesidad tanto en niños como en adultos, lo que está estrechamente vinculado con la prevención de enfermedades no transmisibles relacionadas con la alimentación.

Además de su valor nutricional, la ganadería presenta ventajas importantes en términos de adaptabilidad a diferentes entornos. A diferencia de muchas prácticas agrícolas, el ganado tiene la capacidad de prosperar en áreas que no son aptas para el cultivo, lo que lo convierte en una herramienta clave en la lucha contra el hambre y la malnutrición, particularmente en regiones marginadas. De acuerdo con la FAO (2022), el ganado puede convertir recursos naturales que no son utilizables para la agricultura en proteínas y otros productos alimentarios de alto valor nutricional, como leche y carne. Esto lo convierte en una fuente esencial de alimentos en regiones donde las condiciones

climáticas o del suelo limitan la agricultura, proporcionando seguridad alimentaria a comunidades vulnerables.

La ganadería también es un componente importante para la economía rural. El sector pecuario genera empleo, mejora el sustento de las familias rurales y contribuye al fortalecimiento de la economía regional, especialmente en zonas donde otras formas de agricultura no son viables. Adicionalmente, la ganadería sostenible, que combina el conocimiento tradicional con técnicas modernas, ha permitido que esta actividad sea más rentable y, al mismo tiempo, respete los recursos naturales. Esto no solo contribuye a la seguridad alimentaria, sino que también promueve la sustentabilidad a largo plazo de la actividad ganadera (SADER, 2019).

Por lo tanto, la ganadería en México es una actividad esencial no solo desde una perspectiva económica, sino también desde el punto de vista de la seguridad alimentaria y nutricional. Su capacidad para adaptarse a diversos entornos y su papel estratégico en el combate contra la pobreza, el hambre y la malnutrición hacen de este sector un componente fundamental en la agenda de desarrollo sostenible.

5.2 Impacto ambiental de la ganadería

5.2.1 Degradación del suelo

La degradación del suelo por efecto de la ganadería es uno de los factores clave que contribuyen al deterioro de los ecosistemas terrestres en México y a nivel mundial. El suelo es un recurso finito y fundamental, y su deterioro afecta directamente la capacidad de los ecosistemas para sostener la vida humana y animal, así como la producción de alimentos. En este sentido, la ganadería, especialmente cuando se practica de manera intensiva o sin medidas de manejo sostenible, tiene un impacto directo sobre la salud de los suelos.

En ese sentido, el suelo es la base estructural y funcional de todos los ecosistemas terrestres, constituyendo un recurso valioso pero finito que actualmente enfrenta serios riesgos. En México, al menos la mitad del territorio presenta algún grado de degradación, tanto hídrica como eólica, lo que afecta negativamente sus funciones vitales (García *et al.*, 2020). Dado que el 95 % del suministro mundial de alimentos depende del suelo, su degradación representa una amenaza crítica para la seguridad alimentaria global.

Diversos factores han contribuido a la degradación del suelo en el territorio nacional, entre ellos las prácticas agrícolas inadecuadas, el sobrepastoreo, la deforestación, la alteración del uso del suelo y el cambio climático (UNAM, 2021). Estas actividades han disminuido la capacidad del suelo para proveer servicios ecosistémicos esenciales, poniendo en riesgo funciones fundamentales para la vida humana y los ecosistemas.

En México, el 64 % de los suelos presenta algún nivel de degradación, en gran parte a causa de la agricultura que se vuelve insostenible. El 28 % de las unidades de producción reporta la pérdida de fertilidad del suelo como su principal problema, mientras que el 20 % de la superficie en distritos de riego sufre de salinidad (Alonzo, 2022).

A nivel nacional, gran parte de los 195 millones de hectáreas del territorio están experimentando procesos severos de deterioro, incluyendo la deforestación, la salinización y la erosión (Morales y Parada, 2005). Las áreas más afectadas por la deforestación son la Península de Yucatán, la selva Lacandona, los Altos de Chiapas, los Chimalapas, la Sierra Norte de Oaxaca, Los Tuxtlas, la Huasteca, los bosques del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (Esparza-Olguín *et al.*, 2020).

La degradación del suelo no solo amenaza la producción agrícola y la seguridad alimentaria, sino que también tiene repercusiones económicas y sociales significativas. La pérdida de fertilidad del suelo reduce la productividad agrícola, lo que puede generar inseguridad alimentaria y agravar la pobreza en las zonas rurales. Además, los suelos degradados emiten más carbono a la atmósfera, contribuyendo al cambio climático (López *et al.*, 2022).

En el trópico mexicano, se observan cada vez más ecosistemas con suelos secos, lo que disminuye la provisión de servicios esenciales como alimentos, forraje, combustibles, materiales de construcción y agua, necesarios para la población y el sector agropecuario (Hernández *et al.*, 2011). Este fenómeno es resultado de la interacción de factores humanos, como el crecimiento demográfico y los modelos de uso del suelo, junto con factores climáticos como las sequías.

Frente a esta situación, es urgente implementar prácticas de manejo sostenible del suelo y políticas de conservación para mitigar estos impactos y garantizar la salud a largo plazo de los ecosistemas y las comunidades humanas.

5.2.2 Degradación de praderas

Las praderas son ecosistemas en los que predominan los pastos o gramíneas, formando extensas áreas de vegetación herbácea que están presentes en los cinco continentes. Estas cubren aproximadamente una cuarta parte de la superficie terrestre y desempeñan un papel crucial en la vida de más de 800 millones de personas alrededor del mundo (Enríquez *et al.*, 2022). Además de su importancia ecológica, las praderas son la fuente principal de alimentación para los sistemas de producción animal, particularmente aquellos que dependen de rumiantes como el ganado bovino, ovino y caprino.

El valor de las praderas va más allá de la simple provisión de forraje, ya que también contribuyen a la regulación de los ciclos de nutrientes y agua, al almacenamiento de carbono en el suelo, y al mantenimiento de la biodiversidad. Su conservación es fundamental tanto para la sostenibilidad de la producción ganadera como para la protección de los servicios ecosistémicos que benefician a la humanidad.

Una de las principales maneras en que la ganadería degrada el pastizal y por ende el suelo es a través del sobrepastoreo. Según Ibarra *et al.* (2018), cuando la densidad de animales es mayor a la capacidad de carga del ecosistema, las plantas no tienen tiempo suficiente para regenerarse, lo que provoca una reducción de la cobertura vegetal. Esta

cobertura es esencial para proteger el suelo de la erosión, ya que actúa como una barrera natural contra el viento y el agua. En su ausencia, el suelo queda expuesto, y la erosión hídrica y eólica aumenta de manera drástica, causando la pérdida de nutrientes y estructura del suelo. Teniendo como consecuencia una menor calidad nutritiva en los pastos.

El proceso de degradación de las praderas o pastizales por mal manejo comienza con la pérdida de vigor en las plantas, que presentan hojas más angostas, un bajo índice de verdor y una menor capacidad de rebrote. Esta disminución en la vitalidad vegetal lleva a una pérdida de cobertura aérea de las especies forrajeras, lo que deja espacio para el desarrollo de arvenses o áreas de suelo expuesto. Estas áreas descubiertas facilitan la compactación del suelo por el pisoteo del ganado y aumentan la susceptibilidad a la erosión (Martínez-Méndez *et al.*, 2016).

Existen varios criterios para identificar un pastizal degradado, entre los cuales se incluyen: a) disminución en la producción y calidad del forraje, b) reducción de la cobertura vegetal y densidad de plantas, c) un bajo número de plantas nuevas resultantes de la resiembra natural, d) procesos de erosión del suelo provocados por la acción de las lluvias, e) presencia de arvenses de hoja ancha y angosta que los animales no consumen, y f) la colonización por gramíneas nativas (Enríquez *et al.*, 2022).

En México, la región tropical cubre aproximadamente una cuarta parte del territorio, y la ganadería bajo pastoreo es una de las actividades económicas más importantes (Martínez-Castro *et al.*, 2015). Se estima que, en al menos 24 estados del país, el número de cabezas de ganado supera la capacidad de carga de los potreros, en relación con la producción de forrajes (INIFAP, 2022). Esta sobrecarga animal ha provocado que alrededor del 50 % de las praderas establecidas se encuentren en un estado avanzado de degradación, lo que reduce drásticamente su capacidad productiva.

Este deterioro se asocia a malas prácticas de manejo, como la siembra de especies forrajeras mal adaptadas, el sobrepastoreo, la quema de vegetación y el agotamiento de

nutrientes del suelo. Estas condiciones favorecen la invasión de arvenses, lo que a su vez disminuye la cobertura de pasto y afecta negativamente la producción de forraje. Como resultado, los ganaderos se ven obligados a reducir la carga animal e incurrir en mayores costos de producción Enríquez *et al.* (2022). Además, los cambios climáticos, caracterizados por un aumento de la variabilidad en las temperaturas, alteraciones en los niveles y la frecuencia de las precipitaciones, así como períodos prolongados de sequía, han intensificado la salinización del suelo y del agua dulce (Martínez-Sifuentes *et al.*, 2022).

Se han realizado investigaciones sobre la rehabilitación de praderas degradadas, teniendo un enfoque en la eliminación de arvenses mediante medios mecánicos y herramientas tecnológicas. Entre estas la de Carrillo *et al.* (2023) la cual trata sobre la reducción de los agroquímicos y control de erosión del suelo, rotación de pastos en el trópico húmedo de México. Este tipo de intervenciones han arrojado resultados satisfactorios a corto plazo. Sin embargo, la degradación de las praderas persiste debido a un manejo inadecuado. El problema central sigue siendo la sobrecarga animal, que excede la capacidad productiva que los forrajes pueden sostener bajo un régimen de pastoreo (INIFAP, 2022).

Es así como, la degradación de las praderas está impulsada por una combinación de prácticas de manejo insostenibles y presiones ambientales.

5.2.3 Emisión de gases de efecto invernadero

A nivel mundial, el sector ganadero, especialmente el de los rumiantes, constituye una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Se estima que este sector contribuye con el 18 % de las emisiones globales de GEI de origen antropogénico (Paccha *et al.*, 2023). Los principales gases emitidos son dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), todos ellos vinculados al calentamiento global (Alayón-Gamboa *et al.*, 2018).

Siendo las deyecciones de los animales que producen una cantidad importante de estiércol y purines (estiércol licuado, pastoso o semilíquido), cuya gestión y manejo es complicado en las explotaciones siendo estas cuando superan una determinada dimensión, generando impactos ambientales debido a la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera, y por la acumulación de micro y macronutrientes en el suelo y en cuerpos hídricos superficiales (Ordoñez-Vargas *et al.*, 2023).

La ganadería bovina es responsable de aproximadamente dos tercios de estas emisiones, en gran medida debido a la fermentación ruminal, que libera grandes cantidades de metano. Estas emisiones de metano entérico representan el 30 % de las emisiones mundiales de metano. Aunque este gas tiene una vida relativamente corta en la atmósfera, su reducción podría tener un impacto significativo en la mitigación del cambio climático (FAO, 2018).

El impacto ambiental de la ganadería no se limita únicamente a la emisión de gases de efecto invernadero. La deforestación para el establecimiento de pastizales y la producción de alimentos para el ganado es otra fuente importante de CO₂, contribuyendo a la pérdida de sumideros de carbono y a la degradación del suelo (Tilman *et al.*, 2011). Esta expansión de la ganadería en áreas sensibles como selvas ha intensificado el cambio climático, ya que la destrucción de estos ecosistemas libera grandes cantidades de CO₂ almacenado en la biomasa y el suelo (Fearnside, 2005).

Además, la producción ganadera también genera emisiones de óxido nitroso (N₂O) a través del manejo del estiércol y el uso de fertilizantes nitrogenados en los cultivos destinados a la alimentación animal (Steinfeld *et al.*, 2006). La manipulación de estos residuos es compleja, especialmente en explotaciones de gran tamaño, lo que genera impactos ambientales considerables. Estos incluyen la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera y la acumulación excesiva de micro y macronutrientes en el suelo y en cuerpos de agua superficiales, afectando la calidad ambiental y los ecosistemas acuáticos (Ordoñez-Vargas *et al.*, 2023).

Según la FAO (2023), desde la producción del alimento para el ganado hasta la llegada de los productos a los consumidores, se generan aproximadamente 6.2 gigatoneladas (GT) de CO₂. El ganado bovino es el principal responsable de estas emisiones, contribuyendo con un 62 %, seguido por los porcinos (14 %), las aves (9 %), los búfalos (8 %), las ovejas y las cabras (7 %). Entre los gases emitidos, el metano es el que más contribuye al calentamiento global, ya que su potencial de efecto invernadero es significativamente mayor a corto plazo en comparación con el CO₂ (Gutiérrez-Fidencio *et al.*, 2024). En términos de productos, la producción de carne es responsable del 67 % de las emisiones, mientras que la producción de leche contribuye con el 30 % (FAO, 2023).

Las emisiones provienen de diversas actividades, como la producción de forrajes, la fermentación entérica, los desechos de los animales, el cambio en el uso de la tierra y la cadena de suministro de productos que, en conjunto, representan 7.1 GT de CO₂, equivalentes al 14.5 % de las emisiones globales de GEI de origen humano.

5.2.4 Huella hídrica

La ganadería tiene un impacto significativo sobre la huella hídrica, ya que requiere grandes cantidades de agua para la producción de carne, leche y otros productos de origen animal. La huella hídrica se refiere al volumen total de agua que se utiliza, tanto directamente como indirectamente, en la producción de bienes y servicios (Pérez *et al.*, 2021). En el caso de la ganadería, esto incluye el agua utilizada para el cultivo de alimentos para los animales, el agua de bebida para los mismos, y el agua necesaria para el procesamiento de productos de origen animal (Hoekstra y Mekonnen, 2012).

Para medir la huella hídrica es necesario un proceso donde se utilizan tres componentes principales, el agua azul (volumen total de agua superficial y subterránea consumida), agua verde (volumen del agua de lluvia almacenada en el suelo) y agua gris (volumen de agua dulce necesaria para asimilar la carga de contaminantes que resultan de un sistema productivo (Zambrano *et al.*, 2016). En promedio la huella hídrica (HH) a nivel mundial

para la producción bovina es de 15,700 L kg⁻¹, dependiendo del tipo de sistema de producción con promedios de utilización de agua verde del 94 % (Esteche *et al.*, 2021).

El impacto de la ganadería sobre la huella hídrica también varía según las prácticas de manejo y la región geográfica. Por ejemplo, en áreas secas o con escasez de agua, la ganadería puede ejercer una mayor presión sobre los recursos hídricos, afectando la disponibilidad de agua para otros usos humanos y ecosistemas. Además, las prácticas de ganadería intensiva suelen ser más demandantes en términos de agua en comparación con sistemas de producción extensiva o semi-intensiva, debido a la necesidad de grandes volúmenes de alimento concentrado y agua para enfriar instalaciones y procesar productos (Peden *et al.*, 2007).

Las grandes concentraciones de animales en sistemas intensivos generan grandes cantidades de desechos que, si no se gestionan adecuadamente, pueden infiltrarse en cuerpos de agua, contaminando acuíferos y ríos con nitratos, fosfatos y patógenos (Steinfeld *et al.*, 2006; Muñiz-Monzón *et al.*, 2022). Esta contaminación puede reducir la calidad del agua potable y afectar la biodiversidad acuática.

En México, se estima que la producción industrial de bovinos para obtener 200 kg de carne deshuesada requiere 1,300 kg de granos, cuya huella hídrica (HH) promedio es de 1,500 litros por kilogramo, además de 7,200 kg de forrajes con una HH de 650 litros por kilogramo. A esto se suman 24 m³ de agua para beber y 7 m³ para el mantenimiento de los animales. En total, la huella hídrica de la carne bovina se estima en 15,300 litros por kilogramo, superando el promedio de otras carnes (Vargas *et al.*, 2019).

Por su parte, Gándara (2022) señala que la producción de carne de res requiere aproximadamente 15,000 litros de agua por kilogramo de carne, mientras que la carne de pollo presenta un consumo menor pero aún significativo, ya que se requieren cerca de 5,000 litros de agua para producir un kilogramo. En el caso de los productos lácteos, la producción de un kilogramo de leche utiliza alrededor de 1,000 litros de agua, mientras

que el queso y la mantequilla son aún más intensivos en agua, con 4,000 litros y 5,000 litros por kilogramo, respectivamente.

Esta diferencia en el consumo de agua entre productos de origen animal resalta la importancia de considerar la huella hídrica de cada tipo de alimento para promover prácticas más sostenibles.

5.3 Sistemas silvopastoriles

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son definidos como una opción de producción pecuaria donde se involucra la presencia de leñosas perennes (árboles o arbustos), y la interacción con otros componentes tradiciones como forrajeras, herbáceas y animales, todo bajo un sistema de manejo integral (Pezo,1999). Este enfoque agroforestal promueve la biodiversidad, reduce la erosión del suelo y mejora la calidad del pasto, todo lo cual contribuye a una mayor productividad del ganado (Libreros-Jaramillo, 2015).

Uno de los principales beneficios de los SSP es su capacidad para secuestrar carbono atmosférico, contribuyendo a la mitigación del cambio climático (Saucedo *et al.*, 2020). Los árboles capturan CO₂ a través de la fotosíntesis, almacenándolo en la biomasa y el suelo, lo que reduce las emisiones netas de gases de efecto invernadero (Montagnini y Nair, 2004). Además, los SSP mejoran la fertilidad del suelo mediante la caída de hojarasca y la actividad microbiana, lo que contribuye a un ciclo de nutrientes más eficiente y una menor necesidad de fertilizantes químicos. Estos sistemas también reducen la degradación del suelo al disminuir la erosión y aumentar la capacidad de retención de agua, lo que es particularmente valioso en áreas vulnerables a la desertificación (Pinto *et al.*, 2020).

Los árboles en los SSP proporcionan sombra y forraje adicional para los animales, lo que puede aumentar su bienestar y rendimiento, reduciendo el estrés por calor y mejorando la salud general del ganado (Murgueitio *et al.*, 2011). Esto resulta en una producción ganadera más eficiente y menos dependiente de insumos externos.

En un estudio realizado por Rivera *et al.* (2016) en Colombia, mostró que los sistemas silvopastoriles (SSP) mejoran el bienestar de las vacas lecheras en el trópico alto al compararlos con sistemas de pastoreo tradicionales. En el sistema tradicional, se observó una mayor presencia de *Haematobia irritans* (mosca del cuerno) en comparación con los SSP, lo que sugiere un menor nivel de infestación en los SSP. Además, la temperatura corporal de los animales fue más alta en el sistema tradicional que en el SSP, lo que indica que los árboles en los SSP proporcionan un mejor confort térmico, reduciendo el estrés por calor. La presencia de árboles también favoreció un comportamiento digestivo más variado en las vacas, permitiendo un pastoreo más diverso y eficiente (Zúñiga *et al.*, 2020).

5.3.1 Arreglos silvopastoriles

Los arreglos o diseños silvopastoriles pueden variar según los objetivos de la producción, las especies vegetales utilizadas y las condiciones agroecológicas del lugar. A continuación, se mencionan los principales tipos de arreglos silvopastoriles (Saucedo-Uriarte *et al.*, 2022).

- 1) Cercas vivas: cultivos de árboles, arbustos o palmas teniendo como beneficio el suministro de leña, abono verde, flores comestibles, forraje y madera para tutores de cultivos, al igual que reducen considerablemente los costos de construcción y mantenimiento de las cercas perimetrales de las fincas o potreros donde se puede poner desde una o dos especies dominantes o más de dos especies leñosas de diferentes alturas (Navas-Panadero *et al.*, 2021).
- 2) Árboles en callejones: la siembra de forrajes es realizada entre diferentes hileras de árboles o arbustos, mejorando el balance hídrico y reduciendo la evaporación y el estrés calórico en los animales (Saucedo *et al.*, 2020).
- 3) Árboles dispersos en potrero: la distancia entre árboles debe de estar sembrados a una distancia de 4 a 10 m o más, su principal beneficio es el dar sombra y proveer proteína en épocas críticas.

- 4) Bosque en potrero: consiste en hacer un encierro o establecer a los árboles en grupos, en un cuarto de hectárea, cuya distancia entre los árboles es diseñada de acuerdo con la especie, creando un área de fácil acceso para que los animales encuentren sombras, refugio y confort.
- 5) Cortinas rompevientos: este arreglo tiene el propósito de controlar la velocidad del viento para proteger a los cultivos, al suelo de la erosión y a los animales en efecto mecánico junto con el secamiento que estos mismos producen
- 6) Cultivos agrícolas en callejones: este arreglo permite la siembra de cultivos anuales en los callejones entre las hileras de especies leñosas.
- 7) Árboles en cultivos agrícolas: el arreglo es donde el árbol está distribuido de una forma dispersa o sistemática dentro o en los bordes de las parcelas agrícolas.
- 8) Plantación de árboles en contorno del rancho: este arreglo es una distribución espacial donde se pueden perseguir varios objetivos tales como la protección contra vientos, la delimitación de tierras o límites de la propiedad, delimitar el potrero, tener una función productiva (madera, alimentos), al igual de ser protectora, confort y embellecimiento, donde pueden combinar especies para producir madera, con especies de rápido crecimiento para la producción de poste (Bueno,2012).
- 9) Bancos de proteína: este arreglo está conformado por dos o más especies de arbóreas o arbustivas, principalmente leguminosas, que son ricas en proteína y otros nutrientes. Funcionan como una fuente alternativa de alimentación, especialmente en épocas de escasez de pasto durante la estación seca. Dentro de sus beneficios aumentan la disponibilidad de alimento de calidad durante todo el año, mejoran el rendimiento del ganado y contribuyen a la sostenibilidad ambiental al mejorar la fertilidad del suelo (Pérez-Olivera *et al.*, 2022).

5.3.2 Relación suelo-planta-animal

La relación entre suelo, planta y animal es fundamental para el equilibrio de los ecosistemas y la sostenibilidad agropecuaria. El suelo provee nutrientes esenciales y soporte físico para el crecimiento de las plantas, que a su vez transforman la energía

solar en biomasa a través de la fotosíntesis. Esta biomasa sirve de alimento para los animales herbívoros, que dependen directamente de las plantas para su nutrición.

A su vez, los animales contribuyen al suelo mediante la descomposición de sus excretas y restos orgánicos, lo que enriquece el suelo con materia orgánica y nutrientes. Este ciclo cerrado es clave para mantener la fertilidad del suelo, la productividad vegetal y la salud animal, promoviendo un sistema interdependiente y sostenible (Andrade y Rubio 2021). En la Figura 1, se muestra de manera integral la relación entre suelo, planta y animal.

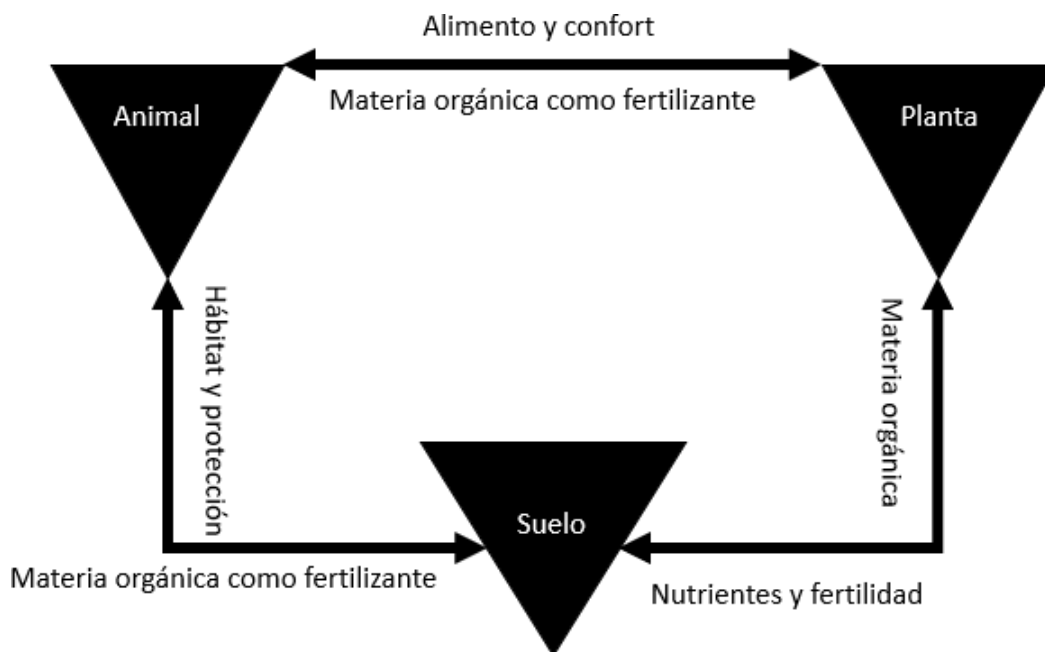


Figura 1. Relación de los elementos suelo-planta-animal

Dentro de estos elementos, el suelo es uno de los recursos fundamentales para la ganadería, ya que suministra los nutrientes necesarios para las plantas que alimentan a los animales. Los microorganismos que habitan en el suelo desempeñan un papel clave en la nutrición tanto de las plantas como de los animales, al contribuir a la fertilidad del suelo y proporcionar un hábitat para diversos insectos.

De este modo la disponibilidad de alimentos está ligada a la diversidad de los suelos, ya que, por sus características morfológicas, funcionales y del estado de salud del suelo depende la producción de frutos y granos, tanto en cantidad como en calidad nutrimental, ya que aportan el 95 % de alimento a todos los organismos incluidos los humanos al proveer con nutrientes a las plantas silvestres y cultivadas (Montaño *et al.*, 2018).

La incorporación de tejidos animales y vegetales al suelo aporta una amplia variedad de elementos minerales en grandes cantidades, los cuales son esenciales para los procesos biológicos. Además, existe una correlación lineal entre los niveles de magnesio (Mg) y hierro (Fe) en plantas y animales (Amangandi *et al.*, 2023).

Por su parte, las plantas actúan como productoras primarias, capturando la energía solar y transformándola en materia orgánica a través de la fotosíntesis, lo que sustenta a los herbívoros y, en última instancia, a los carnívoros. Además, las raíces de las plantas desempeñan un papel crucial en la formación y mantenimiento del suelo, ayudando a prevenir la erosión y mejorando la estructura de este al promover la formación de agregados. Estas interacciones son esenciales para la fertilidad del suelo, ya que las plantas también liberan compuestos orgánicos que alimentan a los microorganismos, que a su vez descomponen la materia orgánica y reciclan los nutrientes disponibles para las plantas (Lavelle y Spain, 2001).

Los animales, por su parte, contribuyen a la salud del suelo y al desarrollo de las plantas a través de sus actividades. Por ejemplo, los herbívoros dispersan semillas y fertilizan el suelo con sus excrementos, mientras que los animales que habitan en el suelo, como lombrices y otros invertebrados, mejoran la aireación y el drenaje del suelo mediante su actividad de excavación. Estos procesos, conocidos como bioturbación, son vitales para la formación de un suelo saludable y fértil. Además, las interacciones entre animales y plantas promueven la biodiversidad y la estabilidad de los ecosistemas, creando una red interconectada de procesos que mantienen el equilibrio ecológico (Wall *et al.*, 2012).

Al establecer sistemas silvopastoriles en áreas de pasturas convencionales hace posible el incremento de las propiedades biológicas del suelo, ayudando a mejorar los procesos que permiten la sostenibilidad, al igual que ayuda a la aparición de macrofauna en un corto tiempo menor a cinco años (Navas *et al.*, 2019).

5.3.3 Indicadores químicos del suelo

El suelo es un recurso indispensable para la vida, y su fertilidad está estrechamente relacionada con sus propiedades físicas, químicas y biológicas. En términos químicos, la fertilidad se refiere específicamente a la disponibilidad de macronutrientes primarios, como el nitrógeno, fósforo y potasio, esenciales para el crecimiento de las plantas (García *et al.*, 2012). Cabe resaltar que aún no existen criterios universales que permitan la evaluación de los cambios en la calidad del suelo, es por eso por lo que son utilizados los indicadores que son atributos edáficos sensibles al manejo y a condiciones edafoclimáticas, entre los que se encuentran los siguientes.

Indicadores físicos: La calidad física del suelo depende del uso y manejo que se proporcione, afectando propiedades como la estructura, densidad aparente, estabilidad de los agregados, infiltración, profundidad del horizonte superficial, capacidad de almacenamiento de agua y conductividad hidráulica saturada. Estas características se proponen como indicadores clave de la calidad física del suelo (García-Gallegos y Hernández-Acosta 2024).

Indicadores químicos: Los indicadores químicos reflejan aspectos que influyen en la relación suelo-planta, la calidad del agua, la capacidad amortiguadora del suelo, la disponibilidad de agua y nutrientes para plantas y microorganismos. Entre estos indicadores destacan la disponibilidad de nutrientes, el carbono orgánico total y lábil, el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de absorción de fosfatos, la capacidad de intercambio catiónico, y los cambios en la materia orgánica, el nitrógeno total y mineralizable (Díaz *et al.*, 2024).

Indicadores biológicos: Estos indicadores incluyen factores que afectan la calidad del suelo a través de la actividad de macroinvertebrados, que, al construir galerías, nidos y sitios de alimentación, contribuyen a la mezcla y redistribución del suelo. Esta actividad puede influir directa o indirectamente en procesos como la incorporación de materiales, formación de comunidades microbianas, y transporte de propágulos. Los indicadores biológicos incluyen la tasa de respiración del suelo, el ergosterol y otros subproductos fúngicos, las tasas de descomposición de residuos vegetales y los contenidos de nitrógeno y carbono de la biomasa microbiana (García *et al.*, 2012).

5.3.4 Indicadores químicos del pasto

Los pastos son ecosistemas que proporcionan un recurso alimentario económico, fundamentalmente para la alimentación de rumiantes, y constituyen una base para la producción y sustento en numerosas áreas rurales alrededor del mundo. En el trópico mexicano, las gramíneas y el follaje de árboles y arbustos leguminosos se utilizan tradicionalmente como suplementos en la dieta animal. Sin embargo, se desconoce su valor nutricional, lo que dificulta garantizar un uso adecuado y una producción sostenible (Motta *et al.*, 2019).

En esta región tropical, se han introducido nuevas especies de pastos que se adaptan mejor a las condiciones climáticas y ofrecen una mayor eficiencia productiva en comparación con las especies nativas. A pesar de esto, estas nuevas especies a menudo presentan deficiencias en proteínas, energía o minerales en su composición. Por lo tanto, son esenciales estudios relacionados al contenido nutricional de los forrajes a través de análisis proximal o bromatológicos, que evalúan aspectos como el contenido de cenizas, grasas totales, proteínas totales, fibra cruda y carbohidratos solubles (López-Medina *et al.*, 2022).

Así mismo para determinar la composición química de los pastos es necesario el uso de distintos estudios tales como materia seca la cual se consigue a partir del uso de una estufa para obtener la concentración de proteína cruda y cenizas, fibra detergente neutro,

fibra detergente ácido y por último lignina (Jiménez-Alfaro *et al.*, 2020). En el Cuadro 1, se representan los valores de los principales elementos minerales del forraje para las necesidades del ganado bovino en pastoreo en las regiones tropicales, expresado en mg Kg de forraje.

Cuadro 1. Necesidades de minerales de bovinos en pastoreo en regiones tropicales (mg kg⁻¹)

Nivel	Ca	P	Mg	K	Na	Cu	Fe	Zn
Máximo	15000	7000	6000	30000	16000	40	30	390
Mínimo	3000	2500	2000	8000	600	10	500	500

Fuente. Castrejón *et al.* (2021)

En el trópico en la Península de Yucatán, México, existe una gran variedad de plantas forrajeras que pueden ser utilizadas como una gran opción de alimentación para el ganado, ya que cuentan con una gran digestibilidad y nutrientes sin importar la estación del año (Cab-Jiménez *et al.*, 2015). Entre los pastos más utilizados en estas áreas se encuentran brizantha (*Brachiaria brizantha*), tanzania (*Megathyrsus maximus* cv Tanzania), mombazza (*Panicum maximum*), estrella de África (*Cynodon plectostachyus*), taiwan (*Pennisetum purpureum*), king grass (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoides*), maralfalfa (*Pennisetum sp*) con valores de proteína que varían de un 7 a 9 % y entre 10.2 a 11.3 %, energía bruta de 3,940 a 4,070 kcal kg (Valles *et al.*, 2016).

En los sistemas silvopastoriles se ha demostrado que al tener una asociación de leucaena (*Leucaena leucocephala*) y del pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis* Vandyerst), los niveles de proteína cruda (PC) son superiores a los adecuados para cubrir los requerimientos de bovinos en pastoreo mientras que la fibra detergente neutra y fibra detergente ácida están entre los estándares normales en comparación con otras leguminosas y gramíneas, y en cuanto a los minerales presentan una deficiencia de Ca, P, Cu y Zn, que es muy asociado al nivel bajo de los minerales en el suelo (Santiago *et al.*, 2016).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Localización

El estudio se realizó en las comunidades de Adolfo López Mateos y Silvituc del municipio de Escárcega, Campeche, México (Figura 2). Este municipio es una llanura de depósito lacustre de piso rocoso o cementado, se encuentran tipos de suelo variados como Leptosoles 46.96 %, Vertisoles 37.96 %, Gleysoles 1.84 % y Luvisoles 0.19 % (INEGI, 2010). El clima predominante es subhúmedo con lluvias en verano, con una humedad media del 85 %.

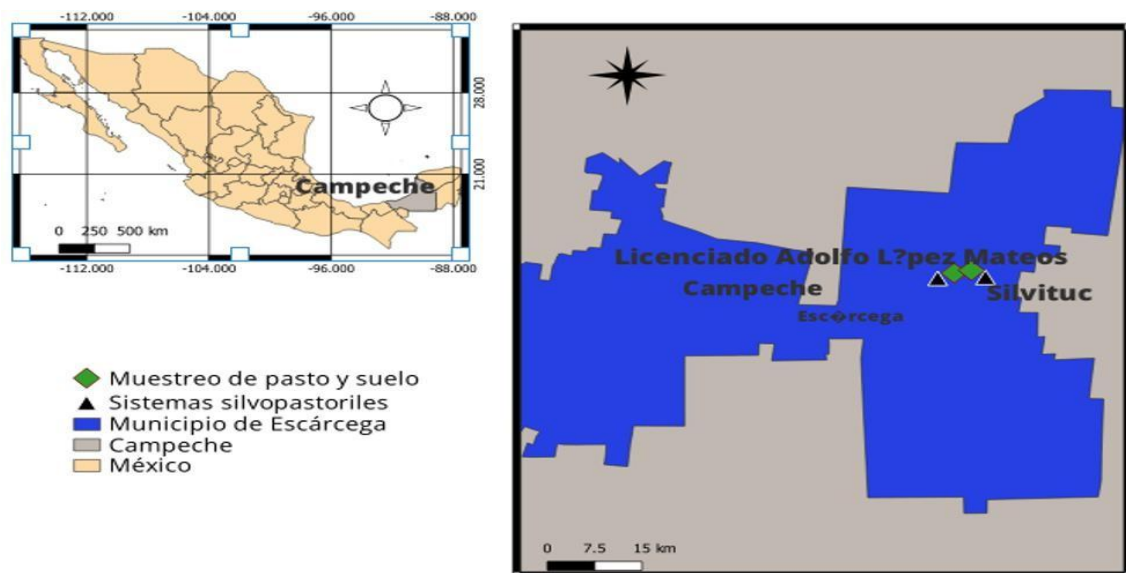


Figura 2. Localización de las comunidades de Adolfo López Mateos y Silvituc, Escárcega, Campeche.

6.2 Arreglos silvopastoriles

Para esta investigación se consideraron dos arreglos silvopastoriles los cuales se describen de manera general a continuación.

Árboles dispersos en potrero. Para este arreglo se tomó el arreglo ubicado en el rancho “La Lupita”, localizado en la localidad de Silvituc, Escárcega, Campeche (Figura 2). En el cual existía la presencia mínima de 45 árboles forrajeros ha^{-1} distribuidos de manera aleatoria y con diámetros mayores a 10 cm, este arreglo es conocido como árboles dispersos en potreros. El pasto presente en este sistema fue una mezcla de pastos tanzania (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzania) y mulato (*Brachiaria plantaginea*).

Banco de proteína. Para este arreglo se consideró el arreglo ubicado en el rancho “Los Robles”, localizado en la localidad de Adolfo López Mateos, Escárcega, Campeche (Figura 2). En este, existía la presencia de árboles forrajeros de *Leucaena leucocephala* cv. Cunningham con una densidad de siembra aproximada de 20 000 plantas ha^{-1} distribuidos en hileras, con distancias entre hileras de 1 m. En este sistema el pasto presente fue una mezcla de pasto brizantha (*Brachiaria humidicola*) y mulato (*Brachiaria plantaginea*).

6.3 Encuesta

Para fines descriptivos, se conformó un cuestionario de 17 preguntas relacionadas a aspectos generales del sistema y del pastizal para conocer el manejo de este. Para ello, se realizó una entrevista a cada productor en la unidad de producción.

6.4 Muestras y análisis de pasto

En cada unidad productiva, la recolección de muestras de pasto se realizó por medio del método del cuadrante (Alarcón 2017; Demanet, 2018). Este consistió en tomar cinco puntos (Figura 3) en un área de 5 000 m^2 y en cada punto se tiró al azar por tres ocasiones un cuadrado de 1 m^2 , teniendo una totalidad de 15 submuestras de pasto por unidad productiva. Adicionalmente, de acuerdo con la escala de Barcellos (1986) (Cuadro 2), por observación directa y de manera subjetiva, se tomaron características descriptivas de la degradación del pastizal dentro del cuadrante, relacionadas al color del pasto, presencia de materia muerta, porcentaje de suelo desnudo y arvenses.

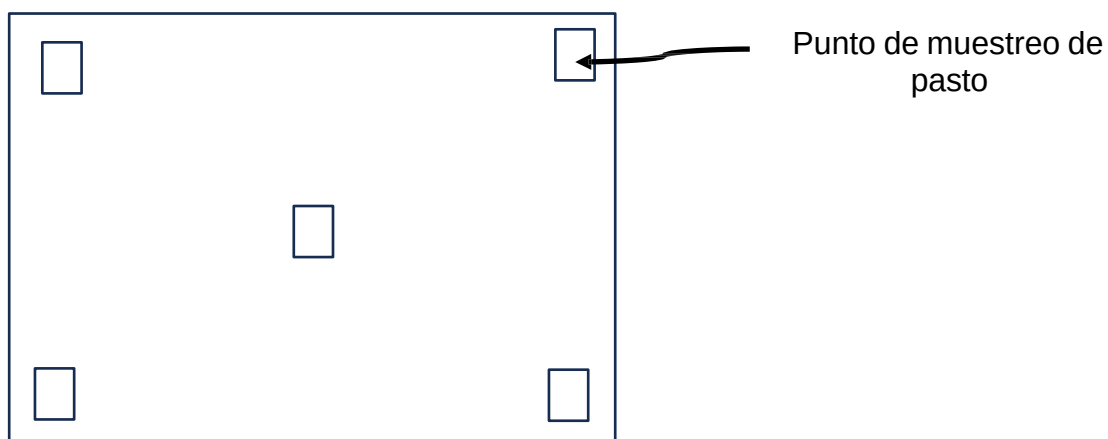


Figura 3. Ejemplo representativo del área y distribución de puntos de muestreo de pasto en arreglos silvopastoriles de Escárcega, Campeche.

Cuadro 2. Descripción cualitativa y cuantitativa de los cuatro niveles de degradación de pasturas

Signo	Nivel de degradación			
	1	2	3	4
	No aparente	Leve	Moderado	Severo
Color	Verde oscuro	Verde claro	Verde-amarillo	Amarillo
Materia muerta	<10 %	11-20 %	21-30 %	>30 %
Suelo desnudo	<10 %	11-20 %	21-30 %	>30 %
Arvenses	<10 %	(aparición de arvenses de hoja angosta)	(aparición de arvenses de hoja ancha)	(más colonización de la pastura por gramíneas nativas)

Barcellos (1986).

De esta forma, en cada lanzamiento del cuadrante, se observó de manera generalizada el área de muestreo y se les asignó escalas según criterio del observador, sin hacer remoción de ningún material vegetal dentro del cuadrante o área de muestreo.

Posterior a esta actividad, el material vegetal dentro del cuadrante se cortó a una altura aproximada de 15 cm del suelo, simulando la alimentación del ganado según la metodología descrita por De Gracia (2011). Cada una de las submuestras se pesaron individualmente para ser extrapolado a $T \text{ ha}^{-1}$ de forraje verde. Después de ello, se mezclaron las submuestras para conformar una muestra compuesta de la cual se tomaron tres muestras de 500 g. Estas fueron etiquetadas con los datos principales del productor y del material vegetal, para su posterior análisis en laboratorio.

En el Laboratorio de Ciencia Animal del Colegio de Postgraduados Campus Campeche, Campeche, México, las submuestras fueron puestas a secar por medio de aire frío a 22 °C hasta obtener una humedad menor al 10 %. Después, en un molino eléctrico (High-speed Multifunction GRINDER®), se molieron para obtener un tamaño de partícula de 2 cm. Finalmente, cada submuestra se envió para su análisis químico de fibra y proteína cruda al Laboratorio de Nutrición Animal en la Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México.

Para la determinación de la fibra cruda se utilizó el sistema Weende o proximal, método oficial de la AOAC para el análisis de alimentos (AOAC, 2016). Es un método gravimétrico, donde la muestra es secuencialmente colocada en reflujo en base diluida, seguido por ácido diluido. El residuo resultante se conoce originalmente como la porción indigerible del forraje; en la actualidad se sabe que está compuesto principalmente por celulosa y proporciones variables de polisacáridos no celulósicos y de lignina.

El contenido de proteína cruda fue determinado usando el método de Kjeldahl (AOAC, 2016), en el cual a través de la medición de nitrógeno (N) se estimó el contenido de proteína cruda, utilizando la fórmula de $N \times 6.25$.

6.5 Muestras y análisis de suelo

Las muestras de suelo fueron recolectadas de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), la cual establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Para ello, en cada arreglo silvopastoril se tomaron cinco submuestras de suelo a una profundidad de 20 cm de acuerdo con el diseño que se observa en la Figura 3. Las submuestras recolectadas se mezclaron para obtener una muestra compuesta de un kilogramo.

Las muestras de suelo fueron llevadas al Laboratorio de Ciencia Animal del Colegio de Postgraduados Campus Campeche, en donde se limpiaron de piedras y fueron extendidas para su secado con aire frío (22 °C) por tres días, hasta obtener una humedad <10 %. Seguidamente se tomaron tres submuestras de 200 g para ser pasadas por un tamiz de malla número 10. El suelo resultante se guardó en bolsas con etiqueta informativa del sitio.

Las submuestras tamizadas fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Agua (LASPA) de la Universidad Autónoma de Yucatán, Yucatán, México, para su análisis físico (textura) y químico (nitrógeno total).

Las técnicas empleadas en estos análisis fueron, para textura, utilizando el método AS-09 con el procedimiento de Bouyoucos y mediante el método AS-25 a través de digestión húmeda para nitrógeno total. Todos los procedimientos se llevaron de acuerdo con lo establecido en la norma oficial NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

6.6 Variables

Las variables evaluadas para esta investigación relacionadas a la calidad del pasto fueron: color, porcentaje de presencia de materia muerta, arvenses y suelo desnudo. La producción de forraje verde ($T\ ha^{-1}$), proteína cruda (PC, %) y fibra cruda (FC, %). Para el suelo se evaluó, textura y nitrógeno total (N, %).

6.7 Análisis estadístico

La información que se obtuvo a través de la encuesta y características del sitio de muestreo de pasto fueron analizadas de manera descriptiva. Los datos de calidad química del pasto y del suelo se analizaron mediante un análisis de t de student y la producción de forraje verde mediante ANOVA. Todos los análisis se realizaron mediante el programa SAS/STAT (2002). Para todas las pruebas se utilizó un nivel de significancia al 5 %.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Descripción de la unidad de producción

7.1.1. La Lupita

El rancho La Lupita, ubicado en la localidad de Silvituc, Escárcega, Campeche, México. Es una unidad de producción destinada a la producción de bovinos de carne de la raza Brahman y Beefmaster. La cual lleva 30 años en la actividad ganadera. Dispone de una superficie de 40 ha, dividida en potreros de una hectárea, los cuales son destinados en su totalidad al pastoreo libre de 100 cabezas de ganado en diferentes etapas productivas. El pasto presente en los potreros fue tanzania (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzania) y mulato (*Brachiaria plantaginea*) con tiempo de establecimiento aproximado de 8 años.

El manejo del pastoreo es rotar la totalidad del ganado en los potreros con un periodo de ocupación de cada potrero por tres días y con periodos de descanso de 60 días, para ello se cuenta con cerco eléctrico. No se realiza ninguna labor para la regeneración del pasto y no se tiene conocimiento de la producción de forraje producido al año. El control de arvenses en el pastizal es por medio de chapeo manual. Se cuenta con pozo profundo, sin embargo, la producción del pasto es de temporal, es decir, aprovechan únicamente el agua de lluvia natural para el crecimiento de las plantas.

Dentro de la unidad de producción se tiene un área de 20 ha con un arreglo de árboles dispersos en potrero con presencia mínima de 45 árboles forrajeros ha⁻¹ distribuidos de manera aleatoria y con diámetros mayores a 10 cm. Dentro de las arbóreas forrajeras presentes se encuentra el Jabín (*Piscidia piscipula*), Huaxim (*Leucaena leucocephala*), Chaka (*Bursera simaruba*) y Ramón (*Brosimum alicastrum*), que sirven de alimento para el ganado, además de múltiples beneficios ambientales que fueron mencionados.

7.1.2. Los Robles

Rancho los Robles, ubicado en la comunidad de Adolfo López Mateos, Escárcega, Campeche, México. Es una unidad de producción destinada a la producción de bovinos para carne de las razas Brahman, Beefmaster y Suizo americano. Dispone de 22 años dedicados a la actividad ganadera. Esta unidad posee una superficie de 96 ha, las cuales están divididas en 14 potreros, cada una de diferentes dimensiones. La base de la alimentación es a libre pastoreo basado en pasto brizantha húmícola (*Brachiaria humidicola*) y mulato (*Brachiaria plantaginea*), con tiempo de establecimiento de 2 años. Adicionalmente, los animales se suplementan en época seca con silo de maíz y sorgo y cuentan con sales minerales a libertad.

La totalidad de los animales (70 cabezas animales) es pastoreado en cada potrero, mediante un sistema de rotación con cerco eléctrico, con tiempos de ocupación de dos días y un periodo de descanso de 30 días. El pasto es fertilizado con urea una vez al año y el control de arvenses se realiza mediante chapeo con tractor.

En la unidad de producción se cuenta con diferentes arreglos de sistemas silvopastoriles como cercas vivas basadas en árboles forestales de cedro (*Cedrus*) y chaka (*Bursera simaruba*). Árboles dispersos en potreros con una diversidad aproximada de siete especies forrajeras y un banco de proteína con un área de 8 ha basado en *Leucaena leucocephala* cv. Cunningham, con tiempo de establecimiento de seis años. Este arreglo está distribuido en hileras con siembra a chorrillo y distancia entre hileras de 1 m. El ganado pastorea durante cuatro horas en cada potrero y su utilidad principal es en época de estiaje.

7.2 Pasto

7.2.1. Color, presencia de materia muerta, arvenses y suelo desnudo

El color del pasto en general se clasificó en 70 % en un color verde claro, es decir con un nivel de degradación leve, siendo más prevalente en el sitio con el arreglo de banco de proteínas con un 80 %, mientras que se obtuvo una menor proporción de pasto con coloraciones oscuras para ambos sitios (40 %, árboles dispersos en potreros y 20 %, bancos de proteína).

Lo anterior, sugiere que el banco de proteína favorece un mayor crecimiento, probablemente por el aporte de nutrientes y el microclima creado. Es conocido que las gramíneas bajo mayor cantidad de sombra como es el caso de bancos de proteína promueven una respuesta adaptativa que es conocida como etiofilia o respuesta de sombreado (Abraham *et al.*, 2016), en donde bajo sombra, la luz disponible tiene mayor proporción de longitudes de onda en el rojo lejano activando en las gramíneas el síndrome de evitación de sombra a través de los fitocromos, especialmente el fitocromo B. Por lo que la planta suele elongarse en tallos y hojas para competir por la luz creciendo más arriba para salir de la sombra (Paciullo *et al.*, 2027).

Además, las gramíneas bajo sombra suelen aumentar la cantidad de clorofila para maximizar la absorción de luz en condiciones de baja intensidad, aumentando la densidad y proporción de cloroplastos en las hojas, optimizando la fotosíntesis bajo sombra y priorizando la eficiencia fotosintética y el crecimiento vertical (Días-Filho, 2002). Sin embargo, estas respuestas suelen comprometer el grosor de las hojas, la cantidad de biomasa y la producción de reservas, si no hay un manejo adecuado del sistema.

Los colores oscuros posiblemente indica una acumulación de biomasa madura, la mayor proporción de este color en el pasto en árboles dispersos puede sugerir menor competencia por luz y nutrientes por lo que desarrollan todo su ciclo si no existe un buen manejo de este.

Respecto a la presencia de materia muerta, en el Cuadro 3, se observa que en el banco de proteínas existen porcentajes mayores al 30 %, en comparación al arreglo de árboles dispersos, en donde los mayores porcentajes se observaron en cantidades menores al 10 %. Estos resultados son derivados a que en el banco de proteínas existe una mayor densidad de plantas que aportan material vegetal, además de encontrarse una mayor asociación de plantas junto al pasto, entre las que se encontraron fueron leguminosas como *Clitoria ternatea* y *Canavalia ensiformis*, aportando mayor contenido de material muerto, que puede incorporarse sucesivamente como materia orgánica al suelo.

Cuadro 3. Porcentajes de materia muerta, arvenses y suelo desnudo en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche.

		<10 %	11 a 20 %	21 a 30%	>30%
Árboles dispersos	Materia muerta	40	33	13	13
	Arvenses	33	60	7	0
	Suelo desnudo	40	40	20	0
Banco de proteína	Materia muerta	33	27	0	40
	Arvenses	47	47	7	0
	Suelo desnudo	53	40	7	0

Los resultados en el porcentaje de suelo desnudo tienen relación a la densidad de vegetación presente y al contenido de materia muerta, observándose que para ambos arreglos los porcentajes se distribuyen mayormente entre los rangos de <10 a 20 %, existiendo en el banco de proteínas un menor porcentaje de suelo desnudo, lo que reduce la exposición del suelo y el riesgo a la erosión. A comparación de árboles dispersos en potreros donde existe menor cobertura vegetal.

La presencia de arvenses es un elemento importante del manejo que se tiene sobre el pastizal, en ese sentido, se encontró mayor presencia de arvenses (11 a 20 %) en el arreglo de árboles dispersos en potrero, entendible al tener un ambiente más propicio y mayor disponibilidad de espacio para su establecimiento, mientras que en el banco de proteínas a pesar de no realizar algún manejo especial, el hecho de preservar o

diversificar el número de especies que consume el ganado, propicia una competencia de estas plantas con los arvenses. Lo que sugiere que el banco de proteínas tiene un manejo pasivo pero eficiente contra arvenses.

Los resultados anteriores, son similares a los reportados por Lok y Fraga (2011), quienes investigaron el comportamiento del pastizal en un sistema silvopastoril de *L. leucocephala* obteniendo 25.8 % de arvenses en época de lluvia. Sin embargo, estos mismos autores mencionan que la presencia de *L. leucocephala* favorece ambientes más propicios para el crecimiento de pastos y por lo tanto mayor número de plantas, entre ellas algunas consideradas arvenses. En consideración a lo anterior, Martínez-Méndez *et al.* (2016), recalcan que para la rehabilitación de pastizales es importante los métodos de manejo que se realicen. Es por ello importante mantener un equilibrio entre especies deseables (pastos y leguminosas) y no deseables (arvenses), reforzando la necesidad de estrategias de manejo diferenciadas para cada sistema.

7.2.2. Producción de forraje verde

Para esta variable no se encontraron diferencias ($p > 0.05$) entre los diferentes arreglos como se muestra en el Cuadro 4. Por lo tanto, la disposición de los árboles de las áreas no influyó en la cantidad de forraje producido.

Cuadro 4. Producción de forraje verde en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche

	Forraje verde (T ha ⁻¹)
Árboles dispersos*	14.98 ± 1.26 a
Banco de proteína[†]	17.08 ± 1.28 a

*Mezcla de pastos tanzania (*Megathyrsus maximus* cv Tanzania) y mulato (*Brachiaria plantaginea*), [†] Mezcla de pastos brizantha (*Brachiaria humidicola*) y mulato (*Brachiaria plantaginea*). ^{a,b}. Letras diferentes en columna indican diferencia ($p < 0.05$).

Aunque los árboles en sistemas silvopastoriles contribuyen a mejorar la fertilidad del suelo, el microclima y la disponibilidad de nutrientes (como fijación de nitrógeno en

algunas especies), su efecto en este caso no resultó en un incremento significativo en la producción de forraje. Si bien, el banco de proteína está conformado por *L. leucocephala*, en estos sistemas al incluir arbóreas leguminosas que enriquecen el suelo y mejoran la calidad nutricional del pasto, los resultados indican que, en términos de cantidad de forraje, su rendimiento fue comparable a los árboles dispersos.

Los resultados de esta investigación son inferiores a los reportados por Bacab *et al.* (2014) quienes reportan 185 T ha⁻¹ año⁻¹ de forraje verde de pastos mejorados *Panicum maximum* en un sistema silvopastoril basado en *L. leucocephala* en Yucatán, México. Estos autores recalcan que la asociación de especies arbustivas y gramíneas en este tipo de sistema es una buena estrategia para incrementar la cantidad de forraje disponible.

En la producción de forraje, influyen diferentes factores, al respecto, Mongalos *et al.* (2024), realizaron una evaluación de pastos de la misma familia de *Panicum máximum*, donde mencionan que los factores climáticos como lluvias, temperatura, luminosidad, cobertura y altura de la planta son fundamentales para una buena producción de forraje. Al respecto, los pastos utilizados en ambos diseños silvopastoriles son de alto rendimiento y adaptación en zonas del trópico por lo que al haber condiciones ambientales y manejo similar la biomasa total de forraje tiende a tener el mismo comportamiento.

Es importante destacar que, a pesar de no existir diferencias en ambos arreglos para esta variable, es importante mejorar la selección de la especie de pasto a utilizar, dependiendo del objetivo del productor. Dado que pastos como brizantha, la producción de forraje se considera baja (7.5 T ha⁻¹) (Reyes-Silva *et al.*, 2024), pero la presencia de leguminosas en el área puede mejorar los rendimientos haciéndolo similar a otros pastos con mayor producción como el pasto tanzania.

Las prácticas que se realizan dentro de los potreros también influyen en la cantidad de forraje producido, por ejemplo, un tiempo de descanso adecuado de los potreros es

fundamental para poder incrementar la cantidad de biomasa forrajera (Azuara-Morales *et al.*, 2018).

Estos resultados refuerzan la idea de que la elección entre árboles dispersos o bancos de proteína depende más de objetivos específicos del productor (calidad del forraje, sombra para el ganado, o restauración ecológica) que de diferencias significativas en rendimiento total de biomasa.

7.2.3. Proteína cruda

El contenido de proteína cruda fue similar ($p > 0.05$) en pastos en ambos arreglos silvopastoriles (Cuadro 5).

Cuadro 5. Proteína cruda (%) de pasto en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche.

	Proteína cruda [§] (%)
Árboles dispersos*	6.79 a
Banco de proteína [†]	5.74 a

*Mezcla de pastos tanzania (*Megathyrsus maximus* cv Tanzania) y mulato (*Brachiaria plantaginea*), [†] Mezcla de pastos brizantha (*Brachiaria humidicola*) y mulato (*Brachiaria plantaginea*). [§] Reportado en base seca. ^{a,b}. Letras diferentes en columna indican diferencia ($p < 0.05$).

En sistemas silvopastoriles, las condiciones específicas de manejo, composición botánica y fertilidad del suelo influyen significativamente en el contenido de proteína cruda del pasto. Por ejemplo, los híbridos del género *Urochloa*, como mulato II y brizantha, presentan valores de proteína aproximados de 8 % similares bajo condiciones óptimas, pero su digestibilidad y rendimiento pueden mejorar con técnicas como la fertilización adecuada o el manejo de cortes (Muñoz *et al.*, 2020).

En general, el contenido de proteína cruda de los pastos evaluados fue bajo, en comparación con los promedios de proteína cruda de pastos en el trópico de México, los cuales, dependiendo de la especie, las condiciones de manejo, y el estado fenológico de

la planta oscilan en un rango de 6 a 16 %. Este rango se debe a factores como la edad de la planta, la época del año, y el manejo del forraje. Además, en estados vegetativos jóvenes, el contenido de proteína cruda suele alcanzar valores más altos, entre 12 % y 16 % (Juárez-Hernández *et al.*, 2007). En las etapas maduras, cuando los tallos comienzan a lignificarse, el porcentaje disminuye a niveles de 6 % o menos, lo que podría explicar los bajos porcentajes encontrados en este estudio.

Bajo ese contexto, Avellana *et al.* (2008) evaluaron la composición química de *Brachiaria* encontrando valores de 7.5 % a una edad de 112 días, indicando que la edad y el manejo del pastoreo son fundamentales en la cantidad de proteína cruda presente en el pasto. De esta manera es evidente que el manejo del pastoreo en las dos unidades productivas es deficiente, por lo que sería necesario realizar ajustes para mejorar la calidad nutrimental del pasto.

Otros autores como Valles *et al.* (2016), reportan porcentajes de proteína cruda de 6.4 % de una mezcla de pastos tanzania y mulato a una edad de 12 semanas en monocultivo, resultado ligeramente inferior al encontrado en el sistema con árboles dispersos, indicando que la presencia de árboles puede mejorar la calidad del pasto al contribuir a la fertilidad del suelo y en consecuencia en la cantidad de nutrientes que el pasto pudiera aprovechar.

Es de esta manera que los bajos contenidos de proteína cruda en los pastos pueden limitar la síntesis de proteína microbiana, fundamental para la nutrición de los animales. La suplementación con fuentes proteicas, como leguminosas o nitrógeno no proteico, es una estrategia viable para mejorar la productividad del sistema. Aunque no se encontraron diferencias estadísticas en el contenido de proteína cruda entre los dos sistemas evaluados, el manejo integral del sistema silvopastoril, considerando factores edáficos y climáticos, es clave para mejorar el valor nutricional de los pastos y, por ende, la eficiencia en la producción animal.

7.2.4. Fibra cruda

La fibra cruda en la dieta de los rumiantes es importante, e incluye componentes como la celulosa, hemicelulosa y lignina, que proporcionan volumen y textura a la dieta. Esto es esencial para estimular la rumia, procesos clave en los rumiantes.

Como puede observarse en el Cuadro 6, los pastos presentes en el arreglo de árboles dispersos en potreros presentaron un valor de fibra cruda superior ($p < 0.05$) al banco de proteína y se encuentran entre el rango reportado de fibra cruda ideal (28-35 %) en base seca para promover una rumia eficiente sin comprometer la digestibilidad total de la dieta.

Cuadro 6. Fibra cruda (%) de pasto en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche.

	Fibra cruda [§] (%)
Árboles dispersos*	34.70 a
Banco de proteína [†]	30.73 b

*Mezcla de pastos tanzania (*Megathyrus maximus* cv Tanzania) y mulato (*Brachiaria plantaginea*), [†]Mezcla de pastos brizantha (*Brachiaria humidicola*) y mulato (*Brachiaria plantaginea*). [§] Reportado en base seca. ^{a,b}. Letras diferentes en columna indican diferencia ($p < 0.05$).

Las mezclas de tanzania y mulato en el sistema de árboles dispersos probablemente contribuyen a un mayor contenido de fibra estructural debido a sus características morfológicas y la exposición directa a la luz solar, en comparación con la mezcla de mulato y brizantha. Los pastos tanzania y mulato tienden a acumular mayores cantidades de fibra cruda a medida que avanzan en su maduración. Según Benítez *et al.* (2017), el pasto mulato y tanzania presentan porcentajes de fibra cruda de 63 % y 28 %, respectivamente. Sin embargo, el comportamiento del pasto brizantha es diferente, ya que presenta un contenido más bajo de fibra cruda (40 %) (Reyes-Purata *et al.*, 2009). Por lo que es importante considerar que los pastos a edades mayores suelen contener mayores cantidades de fibra cruda (Verdecia *et al.*, 2008), la cual, al ser alta, podría

reducir la digestibilidad del forraje y, por ende, el consumo voluntario y la producción animal.

Por otro lado, las especies en el banco de proteína podrían priorizar el crecimiento en contenido proteico, disminuyendo el porcentaje de fibra cruda, lo que complementa el efecto de los sistemas basados en árboles dispersos, especialmente en términos de balance energético-proteico. Además, estos sistemas agroforestales suelen ofrecer mayor sombra, lo que podría mejorar la calidad del forraje al reducir el estrés térmico en las plantas.

En general, los sistemas silvopastoriles, en sus diferentes configuraciones, ofrecen beneficios significativos para el ciclo de nutrientes. Según Martínez *et al.* (2016), la asociación de *L. leucocephala* con pasto estrella presentó un contenido de fibra cruda del 20 % a los 35 días de rebrote. Esto evidencia que el uso de árboles fijadores de nitrógeno, como la *L. leucocephala*, en sistemas silvopastoriles, mejora notablemente la cantidad de fibra cruda disponible en los pastos.

El tiempo de descanso de los potreros es un factor clave que influye en el contenido de fibra cruda de los pastos. En los sistemas con árboles dispersos, el descanso de 60 días permite que los pastos alcancen una etapa madura, lo que incrementa la cantidad de fibra cruda. Por otro lado, el banco de proteína, con un descanso de 30 días, también experimenta un aumento en fibra cruda debido a la maduración de las plantas, aunque el periodo de descanso es menor.

Es importante considerar que el tiempo de rebrote es un factor crítico. Si bien un tiempo adecuado permite optimizar el contenido de fibra cruda, exceder este periodo puede reducir dicha fibra debido a cambios en la composición del forraje a medida que madura. Esta reducción podría beneficiar al animal, ya que niveles excesivos de fibra cruda disminuyen la digestibilidad y la eficiencia del aprovechamiento del alimento. Por lo tanto, una gestión adecuada del tiempo de rebrote es clave para maximizar la calidad del forraje y su valor nutricional para los rumiantes.

Otro factor importante para considerar es la época del año en que se realiza la recolecta. Según Jarma *et al.* (2012), durante la temporada de lluvias, el contenido de fibra cruda tiende a incrementarse debido a la mayor disponibilidad de agua en el subsuelo, lo que favorece un crecimiento y desarrollo más rápido de las plantas. En contraste, durante la temporada seca, la cantidad de fibra cruda suele ser menor, ya que las condiciones de estrés hídrico limitan el crecimiento vegetal.

7.3 Suelo

7.3.1. Textura

El tipo de textura que se encontró en los suelos evaluados fue arcilloso, los diferentes componentes texturales se observan en el Cuadro 7. Las proporciones de los diferentes componentes texturales puede influir en la funcionalidad y el manejo de estos sistemas. En ese sentido, se observa que en suelos de árboles dispersos en potreros la proporción de arcilla es mayor que la de bancos de proteína por lo que puede significar que son suelos con buena capacidad de retención de agua y nutrientes. De acuerdo con Bonifaz *et al.* (2018), los suelos arcillosos son de textura fina, tienen mayor capacidad de almacenamiento de agua y de nutrientes que aquellos de textura gruesa. Pero también suelen presentar problemas potenciales de compactación y drenaje lento.

Cuadro 7. Textura y proporciones de los componentes arena, limo y arcilla de suelos en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche.

	% arena	% limo	% arcilla	Textura
Árboles dispersos	14.24	14.00	71.76	Arcilloso
Banco de proteína	40.76	3.28	55.96	Arcilloso

a.b. Letras diferentes en columna indican diferencia ($p < 0.05$)

La proporción de arena es notablemente mayor (Cuadro 7) en el suelo del banco de proteínas en comparación con el de árboles dispersos. Este perfil textural puede sugerir

un suelo con mejor drenaje y aireación, pero con menor capacidad para retener agua y nutrientes en comparación con los suelos de los árboles dispersos. La clasificación textural encontrada en este estudio es igual a la encontrada por Castillo-Trejo *et al.* (2023), quienes evaluaron la macrofauna edáfica y calidad del suelo en agroecosistemas agrícolas y pecuarios de Campeche.

Al respecto se puede mencionar que la textura afecta las propiedades fisicoquímicas del suelo y la sostenibilidad de los arreglos silvopastoriles. Los suelos arcillosos, como los evaluados, son ideales para sistemas de producción que requieren alta capacidad de retención de agua y nutrientes. Sin embargo, el manejo debe incluir prácticas que mitiguen problemas como la compactación y la susceptibilidad a la erosión.

En relación con los arreglos silvopastoriles en sistemas de árboles dispersos, donde el contenido de arcilla es mayor, podría esperarse que el suelo soporte mejor la vegetación perenne y ofrezca mayor estabilidad estructural para las raíces profundas. Por otro lado, en bancos de proteína, un mayor porcentaje de arena podría facilitar el crecimiento de especies con raíces más superficiales y permitir un drenaje más eficiente, aunque con mayor riesgo de lixiviación de nutrientes. Lo que demanda prácticas para preservar su fertilidad, como el manejo adecuado de materia orgánica.

Con base en ello, es necesario proponer estrategias para las características específicas del suelo y manejo como la incorporación de materia orgánica para mejorar la estructura del suelo y su aireación en suelos arcillosos como los evaluados. Además de implementar drenajes para prevenir encharcamientos.

Para optimizar la sostenibilidad de estos sistemas, es fundamental adaptar las estrategias de manejo a las características específicas de los suelos, promoviendo un equilibrio entre sus propiedades fisicoquímicas y los requerimientos de los cultivos o arreglos silvopastoriles.

7.3.2. Nitrógeno total

El porcentaje de nitrógeno fue diferente ($p < 0.05$) en ambos arreglos como se observa en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Nitrógeno total de suelo en un arreglo en árboles dispersos en potrero y banco de proteína en Escárcega, Campeche

	Nitrógeno (%)
Árboles dispersos	0.41 a
Banco de proteína	0.54 b

a,b. Letras diferentes en columna indican diferencia ($p < 0.05$)

El mayor contenido de nitrógeno en los bancos de proteína puede atribuirse al uso de especies leguminosas en los bancos de proteína, como *Leucaena leucocephala*, que fijan nitrógeno mediante su asociación simbiótica con bacterias del género *Rhizobium* (Llamas y Acedo, 2016). Estas especies mejoran la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, fomentando una mayor fertilidad y sostenibilidad del sistema Gamarra *et al.* (2000). Aunque los árboles dispersos también contribuyen al reciclaje de nutrientes y la mejora de la estructura del suelo, su capacidad para enriquecer el suelo con nitrógeno fue menor en comparación con sistemas como los bancos de proteína. Esto puede deberse a la menor densidad de árboles (Nieto, 2012).

Con base en lo anterior, Díaz *et al.* (2021) encontraron que los suelos bajo sombra, como los de los bancos de proteína, presentan un mayor contenido de nitrógeno total (0.29 %) a una profundidad de 10 - 30 cm, en contraste con los suelos expuestos al sol (0.20 %) en la misma profundidad. Este hallazgo sugiere que los sistemas silvopastoriles con mayor cobertura arbórea favorecen una mayor acumulación de nitrógeno en el suelo, a diferencia de los árboles dispersos, cuya sombra es insuficiente para cubrir completamente el suelo.

Además, las características físicas del suelo también influyen. Los suelos arcillosos, como los evaluados, poseen una mayor capacidad para retener nutrientes como el nitrógeno en comparación con suelos arenosos. También, mayores contenidos de materia orgánica aportan mayores niveles de nitrógeno por la cantidad de biomasa vegetal, en ese sentido, los sistemas silvopastoriles cuentan con mayor aporte de este compuesto al tener la presencia de árboles con mayor follaje, independientemente del arreglo dentro de la unidad productiva.

Según Gutiérrez (2020), destaca que los sistemas silvopastoriles protegen el suelo al reducir los efectos del sol, el agua y el viento. Además, la incorporación de hojarasca, raíces y tallos mejora las propiedades físicas del suelo y aumenta la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y potasio, lo que contribuye a su fertilidad, incrementando la productividad y calidad de las pasturas

Es así como, los bancos de proteína, debido a su composición, presentan ventajas significativas en términos de contenido de nitrógeno, mejorando la fertilidad y la productividad del suelo. Los sistemas de árboles dispersos, aunque también contribuyen al reciclaje de nutrientes y la mejora estructural del suelo, muestran limitaciones en comparación con los bancos de proteína en términos de acumulación de nitrógeno.

Para optimizar el manejo de estos sistemas, es esencial implementar prácticas que promuevan la acumulación y disponibilidad de nutrientes, como la incorporación de materia orgánica y el uso de especies vegetales adaptadas. Además, se recomienda fortalecer la cobertura arbórea en los sistemas de árboles dispersos para maximizar su aporte al ciclo de nutrientes y mejorar la sostenibilidad del suelo en las unidades productivas.

VIII. CONCLUSIONES

La presencia de bancos de proteína en los sistemas silvopastoriles contribuye significativamente a la mejora del contenido de nitrógeno total en el suelo. Sin embargo, este aumento en el contenido de nitrógeno no se traduce en un incremento significativo en la producción de forraje verde ni en el contenido de proteína cruda de los pastos evaluados.

La clase textural fue arcillosa para los suelos de los dos arreglos silvopastoriles, con mayor proporción de este componente en suelos con sistemas de árboles dispersos. Resaltando la necesidad de ajustar las prácticas de manejo según las características del suelo.

Los sistemas silvopastoriles en estudio tienen el potencial de proporcionar beneficios productivos y ecológicos, pero requieren un manejo adaptativo que considere las propiedades específicas del suelo y del forraje.

IX. RECOMENDACIONES

- Incorporar el uso de mayor número de árboles o arbustos en los potreros por los beneficios que estos aportan, en materia orgánica, follaje, retención de agua y nutrientes.
Dar preferencia a leguminosas
- Realizar un mejor manejo de rotación de potreros para evitar compactación del suelo al ser arcilloso y por ende del pastoreo para evitar pastos lignificados y con bajos porcentajes de proteína cruda y elevación de la fibra cruda.
- Uso de drenajes o canales para evitar encharcamientos en época de lluvia.
- La elección entre ambos arreglos dependerá de los objetivos del productor. Los bancos de proteínas son ideales para sistemas intensivos de alimentación, mientras que los árboles dispersos pueden ser útiles en sistemas extensivos con menor necesidad de intervención.

X. LITERATURA CITADA

- Abraham, E. M., Kyriazopoulos, A. P., Parissi, Z. M., Kostopoulou, P., Karatassiou, M., Anjalandou, K., Katsouta, C. (2014). Growth, dry matter production, phenotypic plasticity, and nutritive value of three natural populations of *Dactylis glomerata* L. under various shading treatments. *Agroforestry Systems*. 88(2): 287-299.
- Alarcón MA. (2017). Manual de prácticas. Universidad Veracruzana. 64 p. Disponible en: <https://www.uv.mx/pozarica/cba/files/2017/09/26-Manual-de-practicas-de-produccion-y-manejo-de-forrajes.pdf>
- Alayón-Gamboa, J. (2018) Estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero en la ganadería. *Agro Productividad*, 11(2). 9-15.
- Alonso. (2022). 64 % de los suelos en México, en degradación. Obtenido de Agro Excelencia. Disponible en: <https://agroexcelencia.com/64-de-los-suelos-en-mexico-en-degradacion/>
- Amangandi, O., Román, F., Díaz, B., Ruiz, C.F. (2023). Nutrientes minerales y su relación suelo-planta-animal en praderas de Bolívar-Guaranda-Ecuador. *TESLA* 3(1):1-11.
- Andrade, D.S., Rubio, M.S. (2021). Nociones básicas para entender la relación entre la producción de carne y la sustentabilidad ambiental. *Nacameh*. 15(2):46-72.
- AOAC. (Association of Official Analytical Chemists). (2016). Official Methods of Analysis. 20th Edition. Benjamin Franklin Station, Washington DC. USA.
- Avellaneda, J., Cabezas, F., Quintana, G., Luna, R., Montañez, O., Espinoza, I., Zambrano, S., Romero, D., Vanegas, J., Pinargote, E. (2008). Comportamiento agronómico y composición química de tres variedades de *Brachiaria* en diferentes edades de cosecha. *Ciencia y Tecnología* 1:87-94.
- Azuara-Morales, I., López-Ortiz, S., Jarillo-Rodríguez, J., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E. (2018). Disponibilidad de forraje en un sistema silvopastoril con distintas densidades de *Leucaena leucocephala* L., manejado bajo pastoreo regenerativo. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 22 (1): 53-54.
- Bacab, H.M., Madera, N.B., Solorio, F.J. (2014). Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17(3): 67-81.

- Barcellos, A. (1986). Recuperação de pastagens degradadas. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (EMBRAPA) y Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados (CPAC). 38 p.
- Benítez, E, Chamba, H, Sánchez, E, Parra, S, Ochoa, D, Sánchez, J, Guerrero, R. (2017). Caracterización de pastos naturalizados de la Región Sur Amazónica Ecuatoriana: potenciales para la alimentación animal. *Bosques Latud Cero*. 7(2):83-97.
- Bonifaz, N., León, R, y Gutiérrez, F. (2018). Pastos y Forrajes del Ecuador. Quito, Ecuador. Editorial Universitaria Abya-Yala., Quito-Ecuador. 160 p.
- Bueno GA. (2012). Sistemas silvopastoriles, arreglos y usos. *Revista Sistemas de producción agroecológicos* 3(2):58-83.
- Cab-Jiménez FE, Ortega-Cerrilla ME, Quero-Carrillo AR, Enríquez-Quiroz JF, Vaquera-Huerta H, Carranco-Jauregui ME. (2015). Composición química y digestibilidad de algunos árboles tropicales forrajeros de Campeche, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11: 2199-2204.
- Carrillo, G.A., Anaya, S.A., Bonilla, O.C., Soriano, R. (2023). Estudio de caso de ganadería regenerativa en el trópico mexicano. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 23(Suplemento II): 51-52.
- Castillo-Trejo EY, Flota-Bañuelos C, Alcudia-Pérez J, Fraire-Cordero S, Rosales-Martínez V, Quej-Chí VH. (2023). Macrofauna edáfica y calidad del suelo en agroecosistemas agrícolas y pecuarios de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 14(3):413-424.
- Corral, C.A., Zambrano, L.J., Pincay, D.M., Calo, S.G. (2021). Impactos ambientales generados por la ganadería en la provincia de Santo Domingo Tsáchilas. *UNESUM-CIENCIAS*. 5(2):69-78.
- De Gracia, M. (2011). Guía para el análisis bromatológico de muestras de forrajes. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad de Panamá. Disponible en:https://ecitydoc.com/download/guia-para-el-analisis-bromatologico-de-muestras-de-forrajes_pdf
- Demagnet, R. (2018). Métodos de medición de Pastizales. *Praderas y Pasturas* 1-85.
- Dias-Filho, M. B. (2002). Photosynthetic light response of the C4 grasses *Brachiaria brizantha* and *B. humidicola* under shade. *Scientia Agricola*. 59(1): 65-68.

- Díaz JR, Rodríguez JD, Sarmiento MA, Castro AM, Martínez Y. (2024). Valoración de algunas propiedades fisicoquímicas y químicas de los suelos ferralíticos rojo lixiviados en la localidad la cueva del municipio Viñales. *Revista Científica sobre diversidad biológica y su gestión integrada*. 14(1):70-79.
- Díaz, M.I., Gamarra, C.C., Vera, M.L., Santa-Cruz, A.V. (2021). Contenido de nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles de *Prosopis* spp. Del Chaco Central Paraguayo. *Revistas Cubana de Ciencias Forestales*. 9(2): 226-240.
- Duarte, J., Andrade, H., Molina, C. (2021). Impacto de los sistemas silvopastoriles en la captura de carbono y mejora del suelo en zonas tropicales. *Revista de Agroforestería*. 23(2): 123-137.
- Enríquez Quiroz, J. F., Esqueda Esquivel, V. A., Martínez Méndez, D. (2022). Rehabilitación de praderas degradadas en el trópico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*. 12: 243-260.
- Esparza-Olguín LG, Maya A, Hernández G, Martínez E. (2020). Jardín botánico y arboretum: estrategias de conservación forestal en paisajes antropizados del trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 11(60): 50-77.
- Esteche, S., Martínez, A., Piacenza, M., Scarzello, F. (2021). El impacto ambiental de la producción de carnes. Obtenido de Facultad de ciencias de la Alimentación: <https://www.fc.al.uner.edu.ar/el-impacto-ambiental-de-la-produccion-de-carnes/>
- FAO. (2018). Soluciones ganaderas para el cambio Climático. Obtenido de FAO: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/4c38936f-8175-4752-bb66-32710168079e/content>
- FAO. (2022). Contribución de la ganadería a la seguridad alimentaria, los sistemas agroalimentarios sostenibles, la nutrición y las dietas saludables. Roma: FAO. Obtenido de FAO: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3cb2a290-a893-45fc-bde0-a2d93e3a3254/content>
- FAO. (2023). La ganadería representa 12% de las emisiones de gases con efecto invernadero. Obtenido de FAO: <https://www.fao.org/republica-dominicana/noticias/detail-events/es/c/1675383/>

- Fearnside, PM. (2005). Deforestation in Brazilian Amazonia: History, rates, and consequences. *Conservation Biology*. 19(3): 680-688.
- Gamarra, C.A., Díaz, M.I., Vera, M., Galeano, M.P., Cabrera, A.J.N. (2018) Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Científica de Ciencias Forestales*. 9(46): 4-25.
- Gándara, A. (2022). Hablemos del agua, de los alimentos y de nuestra huella hídrica. Obtenido de Tecnológico de Monterrey: <https://blogsostenibilidad.tec.mx/es/vida-sostenible/hablemos-del-agua-de-los-alimentos-y-de-nuestra-huella-hidrica>
- García, M, Pérez A, Martínez B, Gutiérrez V, Zúñiga C. (2020). Cambio de uso del suelo y variabilidad climática en Chiautzingo, Puebla, México. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático* 6(11):1295-1805.
- García, Y., Ramírez, W., Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes*, 35(2):125-137.
- García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E. (2024). Indicadores de calidad para suelos forestales dentro de un Área Natural Protegida. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 15(85): 27-47.
- Gutiérrez, C.C., Mendieta, B.G. (2022). Sistemas silvopastoriles: una alternativa para la ganadería bovina sostenible. *La Calera*. 22(38): 46-52.
- Gutiérrez, D.M. (2020). Servicios ecosistémicos presentados por el suelo. Trabajo de grado. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/60ccad9f-c091-4327-b6fa-a32396df58f3/content>
- Gutiérrez-Fidencio M, Ramírez-Mella M, López-Rosas I, Ramírez-Bribiesca JE, Crosby-Galván MM, Hernández-Rodríguez M, Sánchez-Villareal A. (2024). Potencial antimetanolgénico del jengibre (*Zingiber officinale*) en la ganadería de rumiantes. *Agro-divulgación*. 4(4): 101-103.
- Hernández Cerda, M. E., Carrasco Anaya, G., Alfaro Sánchez, G. (2011). Degradación del suelo en una zona semiárida tropical de México. *Geográfica de América Central*, 2:1-14.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109(9):3232-3237.

- Ibarra F, Martín M, Moreno S, Ibarra F López RR. (2018). Cambios de vegetación y costos asociados con el continuo sobrepastoreo del ganado en el pastizal mediano abierto de Cananea, Sonora, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*. 42: 855-866.
- Ibrahim, M., Guerra, L., Casasola, F., Neely, C. (2010). Agroforestry-based alternatives to slash-and-burn: Emissions reductions from cattle and soil carbon sequestration. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 140(1-2):193-201.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Escárcega Campeche. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/04/04009.pdf
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2022). Praderas degradadas en el trópico de México son rehabilitadas. Obtenido de <https://www.gob.mx/inifap/articulos/praderas-degradadas-en-el-tropico-de-mexico-son-rehabilitadas>
- Jarma, A., Maza, L., Pineda, A., Hernández, J. (2012). Aspectos fisiológicos y bromatológicos de *Brachiaria humidicola*. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*. 7(1):88-99.
- Jiménez-Alfaro D, Sobalvarro-Mena JL, Elizondo-Salazar JA. (2020). Enriquecimiento proteico de dos especies forrajeras y cáscara de piña por medio de fermentación en estado sólido. *Agronomía Costarricense: Revista de ciencias agrícolas*. 44(2):175-187.
- Juárez-Hernández J, Bolaños-Aguilar ED. (2007). Las curvas de dilución de la proteína como alternativa para la evaluación de pastos tropicales. *Universidad y Ciencia* 23(1):81-90.
- Lavelle, P., & Spain, A. V. (2001). *Soil Ecology*. Springer. Kluwer Academic Publishers. New York, United States of America.
- Libreros-Jaramillo, H. F. (2015). Sistemas Silvopastoriles: opción para la mitigación y adecuación al cambio climático en bosque seco tropical. *Revista Semillas*. Colombia. Recuperado de: <https://www.semillas.org.co/es/sistemas-silvopastoriles-opci>

- Llamas, F. y Acedo, C. (2016). Las leguminosas (*Leguminosae* o *Fabaceae*): una síntesis de las clasificaciones, taxonomía y filogenia de la familia a lo largo del tiempo. *AmbioCiencias*. 14: 5-18.
- Lok S Y Fraga S. (2011). Comportamiento de indicadores del suelo y del pastizal en un sistema silvopastoril de *Leucaena leucocephala* / *Cynodon nlemfuensis* con ganado vacuno en desarrollo. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 45(2): 195-202.
- López DE, Laguna EJ, Ruiz T, Flores-Pacheco JA. (2022). Riesgos de degradación hídrica del suelo posterior al fuego en el trópico húmedo. *Revista del caribe nicaragüense*. 38(76): 54-69.
- López-Medina EN, Álvarez-García R, Téllez-Jurado A, Aguayo-Rojas J, Tovar-Jiménez X. (2022). Análisis químico-Proximal, fitoquímico y potencial bacteriostático de *Eichhornia Crasspies*. *Biotecnia*. 24(2): 36-44.
- Malaviya DR, Baig MJ, Kumar B, Kaushal P. (2020). Effects of shade on guinea Grass genotypes *Megathyrsus maximus* (poales:poaceae). *Revista de Biología Tropical* 68(2): 563-572.
- Martínez M, Reyes A, Lara A, Miranda LA, Huerta M, Uribe M. (2016). Composición nutricional de *Leucaena* asociada con pasto estrella en la Huasteca Potosina de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 16: 3343-3355.
- Martínez-Castro CJ, Ríos-Castillo M, Castillo-Leal M, Jiménez-Castañeda JC, Cotera-Rivera J. (2015). Sustentabilidad de Agroecosistemas en regiones tropicales de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystem*. 18(1): 113-115.
- Martínez-Méndez D, Enríquez-Quiroz J, Ortega-Jiménez E, Esqueda-Esquivel V, Hernández-Garay A, Escalante-Estrada J. (2016). Rehabilitación de una pradera de pasto insurgente con diferentes métodos de manejo. *Revista Mexicana de Ciencia Agrícolas*. 7(8): 1787-1800.
- Martínez-Sifuentes, A. R., Hernández-Herrera, J. A., Valenzuela-Núñez, L. M., Briceño-Contreras, E. A., Manzanilla-Quiñones, U., Gastélum-Arellánez, A., López Calderón, M. J. (2022). Climate change impact on the habitat suitability of *Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco in Mexico: An approach for its conservation. *Sustainability*. 14(14): 8888.

- Mongálos CA, Valdez FD, Huerta AM, López DF. (2024). Productividad estacional de cultivares de *Panicum maximum*. ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias. 8(24): 851-860.
- Montagnini, F., Nair, P.K.R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. Agroforestry Systems. 61(1): 281-295.
- Montaño NM, Navarro MC, Patricio IC, Chimal E, Miguel J. (2008). El suelo y su multifuncionalidad: ¿qué ocurre ahí abajo? Ciencia ergo-sum. 25(3): 1-10.
- Morales, C. y Parada S. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Publicaciones de las Naciones Unidas. Santiago de Chile. 274 p. ISBN: 92-1-322790-6.
- Motta Delgado, P. A., Ocaña Martínez, H. E., Rojas Vargas, E. P. (2019). Indicadores asociados a la sostenibilidad de pasturas: una revisión. Ciencia Tecnología Agropecuaria. 20(2):387- 408.
- Muñiz-Monzón DG, Figueroa-Vázquez VS, Tapia-Frías KV, Vallejo-Ortiz AF, Anda-López L, Ángel-Hernández A. (2022). Impacto ambiental de la ganadería bovina de leche mediante filtración de agua contaminada en la región semiárida del norte de México: Jóvenes en la Ciencia 14: 1-7.
- Muñoz G. A., Garay M, JR., Estrada D, B., Bernal F., A., Limas M., A., Joaquín C, S. (2020). Rendimiento y contenido de proteína en forraje y ensilado de pasto Insurgente e híbridos de *Urochloa*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 11 (24): 177-189.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., Solorio, B. (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. Forest Ecology and Management. 261(10):1654-1663.
- Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R. (2015). El sistema silvopastoril intensivo: una alternativa a la ganadería extensiva tradicional. Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias. 28(4): 291-306.
- Navas A, Daza J, Montaña V. (2019). Desempeño de bancos forrajeros de *Cratylia argentea* (Desv.) Kuntze, en suelos degradados en el departamento de Casanare. Revista de Medicina Veterinaria (39):29-42.

- Navas-Panadero A, Hernández-Larrota JD, Velásquez-Mosquera JC. (2021). Producción y calidad de forraje de *Sambucus nigra* en cercas vivas, Trópico alto colombiano. *Agronomía Mesoamericana*. 32(2): 523-537.
- Nieto, M., González, D., Medina, L., Funes, G. (2012). Los sistemas silvopastoriles como alternativa de uso sostenible del suelo. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordoñez-Vargas WF, Posada-Ochoa SI, Rosero-Noguera R. (2023). Emisiones de gases de efecto invernadero por aplicación de excrementos bovinos al suelo. *Información tecnológica*. 34(1): 101-116.
- Paciullo, D. S. C., Gomide, C. A. M., Castro, C. R. T., Maurício, R. M., Fernandes, P. B., Morenz, M. J. F. (2017). Morphogenesis, biomass and nutritive value of *Panicum maximum* under different shade levels and fertilizer nitrogen rates. *Grass and Forage Science*. 72(3): 590-600.
- Patiño B, Muñoz GI, Baldrich NE, Martínez CA. (2021). Ganadería en sistemas de producción silvopastoril. *Revista Facultad De Ciencias Agropecuarias FAGROPEC* 13(2):156-168.
- Peden, D. et al. (2007). Livestock water productivity and its implications for developing countries: harnessing WP in crop-livestock systems of SSA. A presentation prepared for the IWMI-ILRI-ICRISAT-BMZ workshop, Addis Ababa, Ethiopia, September 24-26, 2007. Nairobi (Kenya): ILRI.
- Pérez J, Macarena Am, Cisneros B, Eloy N, Vuksinic E, Rodríguez CI. (2021). Huella hídrica de la leche y el queso: Un caso de estudio en Tandil, Argentina. *Revista estudios ambientales* 9(2):28-48.
- Pérez-Olivera AF, Gómez-Ramos B, Salinas-Melgoza V, Pérez-Negrón JL, Nuncio-Ochoa GJ, García-Guzmán JM. (2022). Producción y valor nutricional del forraje en un sistema silvopastoril de clima templado subhúmedo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 9(1):52-28.
- Pezo, D., Ibrahim, M. (1999). *Sistemas Silvopastoriles*. Turrialba: centro agronómico tropical de investigación y enseñanza CATIE.
- Pinto, R., García, C. A., De Moura, E. G. (2020). Silvopastoral systems as a strategy in climate-smart agriculture for sustainable cattle production in the Brazilian biomes. *Journal of Cleaner Production*. 249:119392.

- Reyes-Purata A, Bolaños-Aguilar ED, Hernández-Sánchez D, Aranda-Ibáñez EM, Izquierdo-Reyes F. (2009). Producción de materia seca y concentración de proteína en 21 genotipos de pasto humidícola *Brachiaria humidicola* (Rendle) schweick. Universidad y Ciencia. 25(3): 213-224.
- Reyes-Silva F, Chávez-Medina V, Jiménez-Yanez S, Herrera-Feijoo RJ, Uvida-Armijo J. (2024). Eficiencia forrajera del pasto *Brachiaria brizantha* cv. Xaraes utilizando diferentes niveles de biol en el rancho vuelta bajo. Revista de la investigación. 5(1): 502-524.
- Rivera J, Chará J, Barahona R. (2016). Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. Tropical and Subtropical Agroecosystems. 19(3): 237-251.
- Santiago I, Lara A, Miranda LA, Huerta M, Krishnamurthy L, Muñoz-Gonzales JC. (2016). Composición química y mineral de leucaena asociada con pasto estrella durante la estación de lluvias. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. (16): 3173-3183.
- Saucedo J, Oliva M, Maicelo JL, Quispe H, Meléndez JB. (2020). Arreglos silvopastoriles con especie arbórea *Alnus Acuminata* (aliso) y su efecto sobre los factores ambientales de sistemas ganaderos. Revista de Investigaciones Agropecuarias 46(3): 323-328.
- Saucedo-Uriarte JA, Oliva-Cruz SM, Maicelo-Quintana JL, Meléndez-Mori JB, Collazos-Silva R. (2022). Arreglos silvopastoriles con *Alnus acuminata* y su efecto sobre parámetros productivos y nutricionales del componente forrajero. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias. 13(2): 573-583.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). La ganadería mexicana es generadora de riqueza. Obtenido de Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-ganaderia-mexicana-es-generadora-de-riqueza>
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). NOM-021-RECNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). 2000. Que estable las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>.

- Silva L, Jaramillo DA. (2022). Manejo Sostenible de la ganadería en Latinoamérica: Revisión Sistemática 2018-2021. *Revista Ambiente, Comportamiento y Sociedad*. 5(1):1-18.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C. (2006). *Livestock's long shadow: Environmental issues and options*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108(50): 20260-20264.
- UNAM. (2021). Degradado, 45 % del suelo nacional. Obtenido de UNAM: <https://www.gaceta.unam.mx/degradado-45-del-suelo-nacional/>
- Valles B, Castillo E, Bernal H. (2016). Rendimiento y degradabilidad ruminal de materia seca y energía de diez pastos tropicales cosechados a cuatro edades. *Revista Mexicana de Ciencias*. 7(2):141-158.
- Vargas del Ángel, I. É. (2019). *Huella ecológica, huella hídrica y voracidad de la ganadería bovina industrial vs sistemas agroecológicos en América Latina*. Obtenido de Global Forest Coalition: <https://globalforestcoalition.org/wp-content/uploads/2019/11/Mexico-case-study-ES.pdf>
- Verdecia DM, Ramírez JL, Leonard I, Pascual Y, López Y. (2008). Rendimiento y componentes del valor nutritivo del Panicum Maximun cv. Tanzania. *REDVET. Revista Electronica de veterinaria*. 9(5): 1-9.
- Wall, D. H., Bardgett, R. D., Kelly, E. F. (2012). *Soil Ecology and Ecosystem Services*. Oxford University Press.
- Zambrano, M.A., Montenegro, J.P., Reyes, H. (2018). Estimación de la huella hídrica asociada al proceso de beneficio bovino de la cadena cárnica en los frigoríficos Vijagual y Jongovito (Colombia). *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia* 65(3): 235-251.
- Zúñiga, A., Rodríguez, A.C., Benavidez, J.C., Medrano, C., García, F.E. (2020). Indicadores de bienestar animal en vacas lecheras en un sistema silvopastoril del trópico alto colombiana. *Revista de investigaciones veterinarias del Perú*. 31(4): e16871.