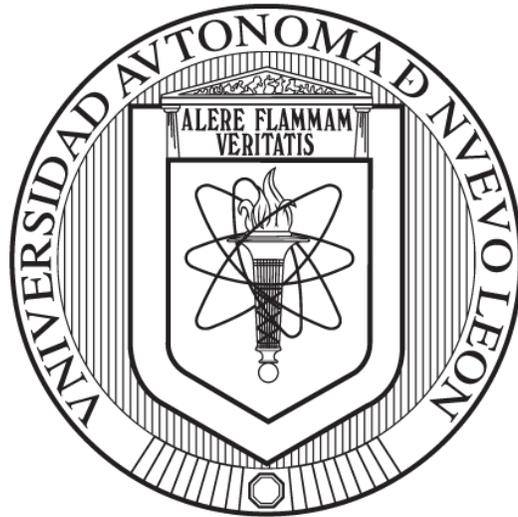


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD NUTRICIONAL
DE PASTOS PARA EL MANEJO DE AGOSTADEROS DEL NORESTE DE
MÉXICO**

TESIS PRESENTADA POR:

JUAN EMMANUEL SEGURA CARMONA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Enero, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD NUTRICIONAL
DE PASTOS PARA EL MANEJO DE AGOSTADEROS DEL NORESTE DE
MÉXICO**

TESIS PRESENTADA POR:

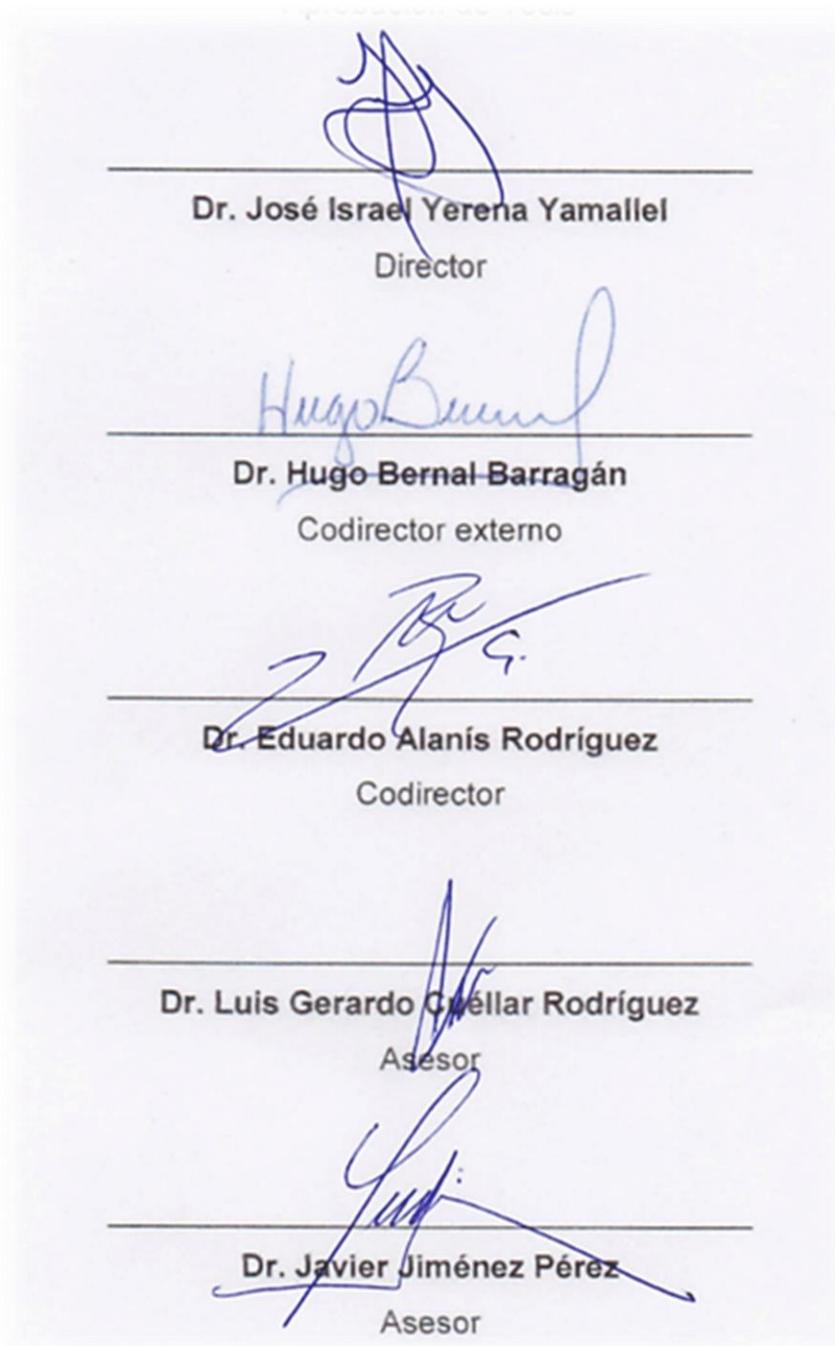
JUAN EMMANUEL SEGURA CARMONA

Como requisito parcial para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN
MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Enero, 2024

**ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA, PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD NUTRICIONAL
DE PASTOS PARA EL MANEJO DE AGOSTADEROS DEL NORESTE DE
MÉXICO**

Aprobación de Tesis



Enero, 2024

Agradecimientos

Al Dr. José Israel Yerena Yamallel por darme la oportunidad de desarrollar esta investigación y por el apoyo brindado a lo largo del posgrado.

A los doctores Eduardo Alanís, Gerardo Cuellar y Javier Jiménez por la colaboración en esta investigación.

Al Dr. Hugo Bernal Barragán por el interés y apoyo para desarrollar esta investigación, por sus consejos y revisiones objetivas y acertadas.

A la Dra. Nydia Vásquez por el apoyo otorgado en los análisis de composición química de los pastos.

Al Dr. Ricardo Vásquez Aldape (UAAAN) por la identificación de especies vegetales.

Al Laboratorio de Nutrición y Calidad de los Alimentos de la Facultad de Agronomía.

A la Facultad de Ciencias Forestales UANL, por permitir cursar el programa de posgrado.

A la Facultad de Agronomía por permitir realizar la experimentación en sus agostaderos del campus Marín.

A todos aquellos que de una u otra manera me apoyaron para culminar mis estudios de Doctorado.

A CONAHCYT por la beca de manutención brindada durante este posgrado.

A todos ustedes “MUCHAS GRACIAS”

Dedicatorias

A Jehová Dios creador y sustentador de todas las cosas, por permitirme concluir mis estudios profesionales de Doctorado.

A mi esposa Nereyda te dedico esta tesis, agradeciendo tu apoyo incondicional.

A mi hijo Isaac que a pesar de tu condición has sabido sobrellevar mis tardes ocupadas al frente de la computadora y que sé que un día podrás leer estos renglones.

A mi padre Juan, por la comprensión y apoyo a pesar del poco tiempo y visitas que te he destinado en esta etapa de mi vida.

A mi madre Gela⁸, simplemente te dedico cada uno de los logros de mi vida y que lamentablemente hoy no estas con nosotros, pero sé que estarías contenta de leer esto.

A mis hermanos Martha y Pablo, y mis sobrinos, Yose, Christian e Isai, que también vieron mermado el tiempo que les dedicaba, al estar ocupado y no poder visitarlos muy seguido.

ÍNDICE

ÍNDICE	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	IX
RESUMEN GENERAL	XI
ABSTRACT	XIV
1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1 Justificación.....	3
1.2 Hipótesis	4
1.3 Objetivo del trabajo	4
2 CAPÍTULO 1.- ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA BIOMASA AÉREA DE PASTOS PRESENTES EN AGOSTADEROS.....	5
2.1 Resumen.....	5
2.2 Introducción.....	7
2.3 Materiales y métodos	9
2.4 Resultados	13
2.5 Discusión.....	23
3 CAPÍTULO 2.- EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD NUTRICIONAL DE PASTOS EN AGOSTADEROS	26
4 Resumen	26
4.1 Introducción.....	27
4.2 Materiales y métodos	28
4.3 Resultados	35

4.4	Discusión.....	40
5	CONCLUSIONES.....	44
6	BIBLIOGRAFÍA.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores promedio de cobertura aérea, cobertura basal, diámetro aéreo, diámetro basal, diámetro comprimido, altura máxima, altura de los tallos vegetativos, peso verde y peso seco por individuo de cada especie.	15
Tabla 2. Ecuaciones alométricas generales para la estimación de biomasa de pastos.....	17
Tabla 3. Ecuaciones alométricas específicas de estimación de biomasa para las especies <i>Cenchrus ciliaris</i> y <i>Pappophorum bicolor</i>	19
Tabla 4. Ecuaciones alométricas específicas de estimación de biomasa para las especies <i>Aristida purpurea</i> , <i>Tridens texanus</i> y <i>Paspalum pubiflorum</i>	22
Tabla 5. Características de los sitios del agostadero.....	32
Tabla 6. Composición química de las especies de pastos en dos épocas del año37	
Tabla 7. Promedio ponderado de la composición química de los de los pastos por sitio de agostadero.	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variables medidas en las plantas de pastos (A) y formas de volúmenes estimados. (B) A= altura; Atv= altura de tallos vegetativos; Db= diámetro basal; Dcomp= diámetro comprimido; Da= diámetro aéreo.....	11
Figura 2. Prototipo desarrollado para controlar la fuerza con la que se comprimen los individuos de especies gramíneas para su medición.....	11
Figura 3. Regresión de los valores pronosticados y los valores observados. Relación entre la variable diámetro comprimido y el peso seco de cada uno de los pastos evaluados (A). Relación entre el peso verde y el peso seco de los pastos evaluados (B).	13
Figura 4. Relación entre los valores observados y los valores pronosticados por las ecuaciones generales. A) Ecuación general III B) Ecuación general VI. C) Ecuación general IX (diámetro comprimido) y D) Ecuación general XII. Todas las gráficas fueron ajustadas a cero.....	18
Figura 5. Relación entre valores observados y valores pronosticados de las ecuaciones específicas para <i>Cenchrus ciliaris</i> (A y B), <i>Pappophorum bicolor</i> (C), <i>Aristida purpurea</i> (D), <i>Tridens texanus</i> (E) y <i>Paspalum pubiflorum</i> (F).....	21
Figura 6. Área de estudio, sitios ecológicos y parcelas de muestreo.	28
Figura 7. Sitio METLO (Matorral Espinoso Tamaulipeco en lomerío).....	29
Figura 8. Sitio METVA (Matorral Espinoso Tamaulipeco en valle).	29
Figura 9. Sitio MeLLA (mezquital en llanura).....	30
Figura 10. Sitio VSMETLO (vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco en lomerío).	30
Figura 11. Sitio VSMETLLA (vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco en llanura).	31
Figura 12. Distribución de las subparcela de muestreo dentro de la parcela.	31
Figura 13. Producción de biomasa (kg MS ha ⁻¹) por sitio de agostadero. Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa (P<0.05).	35
Figura 14. Aporte de biomasa forrajera anual acumulada de las especies por sitio. Diferentes letras indican diferencia significativa (P<0.05).	36

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

A= Altura

AIC= Criterio de Información de Akaike

Atv= Altura de los tallos vegetativos

CIL1= Cilindro 1

CIL2= Cilindro 2

CIL3= Cilindro 3

CIL4= Cilindro 4

CIL5= Cilindro 5

CIL6= Cilindro 6

COBAC= Cobertura aérea circular

COBAE= Cobertura aérea elíptica

COBBC= Cobertura basal circular

COBBE= Cobertura basal elíptica

CON1= Cono 1

CON2= Cono 2

CON3= Cono 3

CON4= Cono 4

CON5= Cono 5

CON6= Cono 6

Da= Diámetro aéreo

Db =Diámetro basal

Dcomp= Diámetro comprimido

EE=Error estándar

EEM= Error estándar de la media

FDA= Fibra detergente ácido

FDN= Fibra detergente neutro

Ha= Hectárea

Kg= Kilogramo

LN= Logaritmo natural

MeLLA= Mezquital y una topoforma de llanura

MET= Matorral espinoso tamaulipeco

METLO= Matorral espinoso tamaulipeco y una topoforma de lomerío

METVA= Matorral espinoso tamaulipeco y una topoforma de valle

MS= Materia seca

NRMSE= Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado

PC= Proteína cruda

r= Coeficiente de correlación de Pearson

R²= Coeficiente de determinación

VSMETLLA= Vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco en llanura

VSMETLO= Vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco con topoforma de lomerío

Y= Biomasa aérea (g MS-1)

RESUMEN GENERAL

La estimación de biomasa aérea y calidad nutricional de los forrajes del agostadero permite conocer el estado real de la producción de forraje que está disponible para los animales en el pastoreo, lo que contribuye a lograr un manejo eficiente y sostenible del ganado. El objetivo del presente estudio fue evaluar la producción de biomasa presente en un agostadero, y a partir de diversas medidas realizadas en las plantas en paralelo, generar nuevas ecuaciones de regresión, que permitan estimar la biomasa aérea de pastos. Adicional a ello, se determinó la calidad nutricional de los pastos distribuidos en cinco sitios de agostadero: METLO= Matorral Espinoso Tamaulipeco [MET] en lomerío, METVA= MET en valle, MeLLA= Mezquital en llanura, VSMETLO= Vegetación Secundaria [VS] de MET en lomerío y VSMETLLA = VSMET en llanura, en Marín, Nuevo León, México. Para ello, durante el año 2021 se distribuyeron aleatoriamente 31 parcelas de muestreo, en donde a la vegetación presente de pastos se midió la altura máxima y la de los tallos vegetativos, los diámetros aéreo, basal y comprimido, además se estimaron sus volúmenes. Posteriormente cada uno de los pastos se cortaron a una altura de 3 cm y se almacenaron individualmente en bolsas de papel Kraft, registrando su peso verde, después se introdujeron en una estufa de secado a 60°C hasta llegar a peso constante y obtener el peso seco. Muestras representativas de cada especie fueron analizadas para determinar sus contenidos de proteína cruda (PC), cenizas, grasa, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), hemicelulosa, celulosa y lignina. A partir de las mediciones obtenidas en el muestreo, se generaron ecuaciones lineales (stepwise) y no lineales, para estimar la biomasa aérea base materia seca de forma general para todas las especies de pastos y específicas para cada especie. La composición química de los sitios fue calculada considerando la proporción de biomasa aportada por cada especie. La producción de biomasa aérea y composición química fueron analizados mediante un análisis de varianza y cuando resultaron diferentes se compararon las medias por método de Tukey ($p < 0.05$). La producción anual de biomasa aérea fue superior ($p < 0.001$) para el sitio MeLLA e inferior en los sitios METLO, VSMETLO y VSMETLLA. *Pappophorum bicolor*, *Aristida purpurea* y *Cenchrus ciliaris* aportaron la mayor cantidad de biomasa en el

sitio METLO ($p > 0.05$). Las ecuaciones fueron comparadas, basándose en la R^2 (Coeficiente de determinación), r (correlación de Pearson) y AIC (Criterio de Akaike). La ecuación general IX tuvo los mejores valores de $R^2 = 0.88$ y $AIC = 3079$, utilizando las cinco variables evaluadas. La ecuación general XII estimó con $R^2 = 0.86$ y $AIC = 3530$, utilizando solo la variable de diámetro comprimido. En las ecuaciones específicas, el modelo lineal que utilizó las cinco variables directas con algunos de los volúmenes fueron las que obtuvieron un mejor ajuste para las especies *Cenchrus ciliaris* ($R^2 = 0.88$, $r = 0.94$, $AIC = 1603$), *Pappophorum bicolor* ($R^2 = 0.85$, $r = 0.92$, $AIC = 287$), *Aristida purpurea* ($R^2 = 0.92$, $r = 0.96$, $AIC = 87$). Sin embargo, el modelo cubico con la variable cilindro 3 utilizan el diámetro comprimido y la altura fue el de mejor ajuste para las especies *Tridens texanus* ($R^2 = 0.91$, $r = 0.96$, $AIC = -18$) y *Paspalum pubiflorum* ($R^2 = 0.93$, $r = 0.97$, $AIC = 57$). En los sitios MELLA, MeLLA y VSMETLO *Cenchrus ciliaris* registró la mayor proporción ($p < 0.05$) de biomasa aérea, mientras que en el sitio VSMETLLA fueron *Cenchrus ciliaris* y *Paspalum pubiflorum*. *Paspalum pubiflorum* registró mayor contenido ($p < 0.001$) de proteína cruda, menores contenidos ($p < 0.001$) de FDN y FDA. *Aristida purpurea* y *Pappophorum bicolor* obtuvieron los valores inferiores de proteína y los superiores de FDN y FDA ($p < 0.001$). El contenido de proteína cruda del forraje acumulado en un año fue mayor ($p < 0.01$) para el sitio VSMETLLA, y menor ($p < 0.01$) para el sitio METLO. El contenido promedio ponderado anual de FDA y de lignina fue menor ($p < 0.004$) para los sitios METVA y MeLLA, mientras que el valor calculado para el sitio METLO fue el más alto ($p < 0.004$). El contenido promedio ponderado anual de celulosa fue mayor ($p < 0.05$) para el sitio METLO que para el sitio METVA. Las ecuaciones desarrolladas en este estudio son una alternativa confiable para estimar indirectamente la biomasa aérea de los pastos de los agostaderos del noreste de México, de forma más rápida y menos costosa que el método tradicional. La producción de biomasa y calidad nutricional difiere entre sitios del agostadero, por lo que es necesario determinarla en cada uno de los sitios donde pastorea el ganado, en nuestro estudio los sitios con topografía de lomerío presentaron menor producción de biomasa y calidad nutricional. Aunque las especies de pastos se distribuyen en diferentes proporciones en los sitios, la especie *Cenchrus ciliaris* se

encuentra ampliamente distribuida en el agostadero, aportando una proporción significativa de la biomasa forrajera presente. La composición química de las principales especies de pastos analizadas permite tener una idea acertada de la calidad nutricional de la dieta de los animales en pastoreo. La especie *Aristida purpurea* fue la de menor calidad forrajera. Las especies *Paspalum pubiflorum*, *Cenchrus ciliaris* y *Chloris sp* fueron las que resultaron con la mejor calidad nutricional.

Palabras clave: Ecuaciones alométricas, *Cenchrus ciliaris*, pastos nativos, diámetro comprimido, composición química de pastos.

ABSTRACT

The estimation of aboveground biomass and nutritional quality of grasses allows to know the actual state of the produced forage, which is available for grazing animals. This contributes to improve efficient and sustainable management of rangelands. This study aimed to know the biomass standing in a rangeland and based on several measurements carried out at the plants in parallel, to generate new regression equations to estimate the aboveground biomass of grasses. Additionally, the nutritional quality of the pastures in five sites (METLO, METVA, MeLLA, VSMETLO, VSMETLLA), of a rangeland of Marin, Nuevo Leon, Mexico, was evaluated. Hereby, during 2021, 31 sampling plots were randomly distributed, in whose present plants the maximum height and height of the vegetative stems, the aerial, basal and compressed diameters were measured, and the volumes occupied by each of these grasses present were estimated. Subsequently, each of the grasses were cut at a height of 3 cm and stored individually in Kraft paper bags, obtaining their green weight, then they were placed in a drying oven at 60°C until reaching a constant weight and obtaining the weight dry. Representative samples of each species were analyzed to determine their contents of protein, ash, fat, neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), hemicellulose, cellulose and lignin. From the measurements obtained in the double sampling, linear (stepwise) and non-linear equations were generated to estimate the aboveground biomass (dry matter basis) in a general (all grass species) and specific way. The chemical composition of the sites was calculated considering the proportion of biomass contributed by each species. The production of aboveground biomass and chemical composition were analyzed through an analysis of variance and when they were different, the means were compared by Tukey method ($p < 0.05$). The annual production of aboveground biomass was higher ($p < 0.001$) for the MeLLA site and lower in the METLO, VSMETLO and VSMETLLA sites. *Pappophorum bicolor*, *Aristida purpurea* and *Cenchrus ciliaris* contributed the greatest amount of biomass at the METLO site ($p > 0.05$). The equations were compared, based on the R^2 , r (Pearson correlation) and AIC (Akaike Criterion). The general equation IX had the best values of $R^2 = 0.88$ and $AIC = 3079$, using the five variables evaluated. The general equation XII was

estimated with $R^2=0.86$ and $AIC= 3530$, using only the compressed diameter variable. In the specific equations, the linear model using the five direct variables with some of the volumes were those that obtained the best fit for the species *Cenchrus ciliaris* ($R^2= 0.88$, $r= 0.94$, $AIC= 1603$), *Pappophorum bicolor* ($R^2=0.85$, $r=0.92$, $AIC= 287$) and *Aristida purpurea* ($R^2=0.92$, $r=0.96$, $AIC= 87$). In the MELLA, MeLLA and VSMETLO sites *Cenchrus ciliaris* recorded the highest proportion ($p<0.05$) of aboveground biomass, while in the VSMETLLA site it was *Cenchrus ciliaris* and *Paspalum pubiflorum*. *Paspalum pubiflorum* recorded higher content ($p<0.001$) of crude protein, lower contents ($p<0.001$) of NDF and ADF. *Aristida purpurea* and *Pappophorum bicolor* obtained the lowest protein values and the highest NDF and ADF values ($p<0.001$). The crude protein content of the forage accumulated in one year was higher ($p<0.01$) for the VSMETLLA site, and lower ($p<0.01$) for the METLO site. The annual weighted average content of ADF and lignin was lowest ($p<0.004$) for the METVA and MeLLA sites, while the value calculated for the METLO site was the highest ($p<0.004$). The annual weighted average cellulose content was higher ($p<0.05$) for the METLO site than for the METVA site. The equations developed in this study are a reliable alternative to indirectly estimate the aboveground biomass of the pastures of the rangelands of northeastern Mexico, faster and less expensive than the traditional method. The production of biomass and nutritional quality differs between rangeland sites, so it is necessary to determine it in each of the sites where cattle graze. In our study, sites with a hilly topofom presented lower biomass production and nutritional quality. Although the grass species are distributed in different proportions in the sites, the *Cenchrus ciliaris* species is widely distributed in the rangelands, providing a significant proportion of the forage biomass present. The chemical composition of the main grass species analyzed in this study allows us to have an accurate idea of the nutritional quality of the diet of grazing animals. The *Aristida purpurea* species was the one with the lowest forage quality. The species *Paspalum pubiflorum*, *Cenchrus ciliaris* and *Chloris sp* were those with the best nutritional quality.

Keywords: Allometric equations, *Cenchrus ciliaris*, native grasses, compressed diameter, chemical composition of grasses.

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Los agostaderos son áreas cubiertas con vegetación nativa caracterizados por presentar patrones erráticos de precipitación, topografía accidentada y baja fertilidad del suelo, lo que los hace no susceptibles para la agricultura (Getabalew & Alemneh, 2019). Estas vastas áreas se distribuyen alrededor del mundo, cubriendo más del 40% de la superficie terrestre (Kumar *et al.*, 2015). Frecuentemente son vistos como tierras infértiles para la agricultura, pero brindan un gran número de productos y servicios a la sociedad (Holechek *et al.*, 2020), siendo el hábitat que alberga la fauna silvestre, además del bajo costo del forraje producido permite a los agostaderos ser la principal fuente de alimento de la ganadería extensiva (Sosa-Montes *et al.*, 2021; Jones *et al.*, 2021; Barnettson *et al.*, 2020).

En la actualidad la ganadería provee alimento y productos de importancia para la sociedad contribuyendo a la seguridad alimentaria y crecimiento económico. La demanda de productos ganaderos está aumentando rápidamente como consecuencia del crecimiento de la población, el aumento de los ingresos, los cambios en la dieta y estilo de vida, lo que ha provocado que los recursos del medio ambiente como el aire, la tierra, el suelo, el agua y la biodiversidad resulten afectados por el incremento en la producción (Allen *et al.*, 2016; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2022).

En las últimas décadas los agostaderos han emergido como una opción viable en la lucha contra el cambio climático (Holechek *et al.*, 2020), lo que ha incrementado el interés de los gobiernos, científicos y ganaderos por la conservación de los recursos naturales de este ecosistema (Virgilio *et al.*, 2019). Por lo que la forma en que se administren los recursos actuales del agostadero impactará en el futuro de la humanidad (Holechek *et al.*, 2020).

Una de las decisiones principales en el manejo sustentable del agostadero es ajustar la carga animal de acuerdo con la capacidad de carga animal (Sawalhah *et al.*, 2019). Esta última se define como el número máximo de unidades animal

que pueden ser sostenidas en un área determinada durante un lapso de tiempo generalmente un año, sin causar daño permanente al recurso forrajero (FAO,1991). Este parámetro es susceptible a presentar variaciones entre diferentes años en el mismo lugar, debido a las condiciones climáticas como la precipitación y la frecuencia e intensidad del pastoreo (Cheng *et al.*, 2017). En los agostaderos se recomienda una utilización de 30 al 50 % del forraje total, para mantener las condiciones del suelo, vigor de la planta, calidad de la dieta y alimento para la fauna silvestre (Holechek, 1988).

En la gestión para lograr un aprovechamiento sustentable del agostadero, además de hacer coincidir la carga animal acorde a la capacidad de carga es necesario conocer la composición química y el estado nutricional de las plantas que el ganado pastorea (Barnetson *et al.*, 2020). La estimación de la biomasa forrajera aérea del agostadero es esencial para determinar la cantidad de forraje disponible para el ganado, calculando así la capacidad de carga y evaluar las estrategias de manejo (Flombaum & Sala, 2007; Ganguli *et al.*, 2000).

El método de corte, secado y pesado es el más utilizado en la estimación de la biomasa aérea en los agostaderos, tiene la ventaja de ser preciso y permite la obtención de muestras para su análisis químico (Murphy *et al.*, 2021), sin embargo, consume una cantidad considerable de tiempo y recursos económicos por lo que en la mayor parte de los casos no se lleva a cabo en forma periódica o incluso no se realiza (Paruelo *et al.*, 2000).

Como alternativa al método de corte, secado y pesado, existen diferentes metodologías como la generación de ecuaciones que buscan relación entre las características morfológicas de la planta y su biomasa (Archer *et al.*, 2009), así como estimaciones visuales (Damiran *et al.*, 2007). También se han utilizado para este propósito discos, bastones graduados (Harmoney *et al.*, 1997), teledetección, utilizando imágenes de satélite, de radar y de vehículos no tripulados (Barnetson *et al.*, 2020). Sin embargo, estas metodologías se han enfocado sobre todo para ser utilizadas en praderas o monocultivos, donde la distribución de la vegetación es más homogénea, por lo que se considera limitada

su replicación en áreas de agostadero. La generación de ecuaciones de predicción a nivel de individuo requiere de un muestreo de corte, secado y pesado para realizar la calibración del método (Murphy *et al.*, 2021), y una vez calibrado el muestreo puede llevarse a cabo de forma más rápida (Butterfield & Malmstrom, 2009). Cabe mencionar que estos métodos son susceptibles a requerir recalibración cada vez que son aplicados en áreas diferentes a las unidades de pastoreo en las que fueron generadas (Pottier & Jabot, 2017).

1.1 Justificación

La creciente demanda de productos y servicios brindados por los agostaderos, y los efectos del cambio climático, exige a los manejadores de estos a realizar una explotación de los recursos de una manera eficiente, pero de forma sustentable. Los agostaderos del noreste de México tienen potencial para producir biomasa forrajera de diversas especies de pastos que tienen diferente composición química, para ser aprovechados por la ganadería. Sin embargo, se carece de información actualizada obtenida de forma periódica, referente a la producción de biomasa del agostadero, lo que limita su aprovechamiento sustentable. Generar una metodología que permita facilitar el muestreo de producción de biomasa, brindará una mayor oportunidad de realizar un manejo sustentable del agostadero.

1.2 Hipótesis

Las ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea presentan un mejor ajuste con el modelo no lineal que el modelo lineal.

Los agostaderos se componen de sitios ecológicos los cuales al tener distintas características en suelo, vegetación y topografía poseen diferente potencial de producción de biomasa.

Las especies de pastos que se distribuyen en los agostaderos presentan diferente composición química, lo que influye en su calidad nutricional.

1.3 Objetivo del trabajo

- Desarrollar ecuaciones alométricas específicas para estimar biomasa aérea por especie.
- Desarrollar ecuaciones alométricas generales para estimar la biomasa aérea por grupo de especies de pasto presentes en el agostadero.
- Estimar la producción de biomasa aérea de las especies de pastos por sitio de agostadero.
- Determinar el porcentaje de aporte de biomasa aérea de cada una de las especies por sitio de agostadero.
- Determinar la composición química de las especies de pastos.
- Determinar la composición química de los pastos por sitio de agostadero.

2 CAPÍTULO 1.- ESTIMACIÓN INDIRECTA DE LA BIOMASA AÉREA DE PASTOS PRESENTES EN AGOSTADEROS

2.1 Resumen

Para lograr un aprovechamiento eficiente y sostenible del agostadero es necesario hacer coincidir los requerimientos nutricionales y energéticos del hato ganadero con la tasa de producción de biomasa forrajera. Dado que la vegetación en los agostaderos tiene una distribución heterogénea, los modelos alométricos son una buena opción. El objetivo de este estudio fue: 1) Evaluar las principales características morfológicas de los individuos de las diferentes especies de pastos, 2) Generar modelos alométricos generales y específicos para estimar la biomasa aérea de los principales pastos presentes en el agostadero. El estudio se realizó en agostaderos de la Unidad Académica Marín de la Facultad de Agronomía de la UANL, localizada en el municipio de Marín, Nuevo León. La muestra fue de un total de 745 individuos evaluados de cinco especies diferentes (*Cenchrus ciliaris* n=424, *Pappophorum bicolor* n=125, *Aristida purpurea* n=107, *Paspalum pubiflorum* n=30 y *Tridens texanus* n=59). El estudio se basó en un doble muestreo del 15 de junio al 8 de noviembre del 2021, a cada individuo se le midió altura máxima, altura de los tallos vegetativos, diámetro basal, diámetro aéreo y diámetro comprimido. Posteriormente se cortó cada uno de los individuos para conocer su peso con base en materia seca. Mediante análisis de regresión se generaron ecuaciones alométricas que permitieran estimar de forma indirecta la biomasa aérea de los pastos presentes. Las ecuaciones generales que utilizan menos variables y cuyas estimaciones registraron buena confiabilidad, fueron la ecuación XII ($R^2=0.86$), la ecuación X ($R^2=0.90$) y la ecuación XIV ($R^2=0.90$). *C. ciliaris* generó ocho ecuaciones con R^2 de 0.87 a 0.91. Para la especie *P. bicolor* se obtuvieron 4 ecuaciones con R^2 de 0.85 a 0.87. Con las variables de la especie *A. purpurea* se generaron cinco ecuaciones con R^2 de 0.89 a 0.92. La especie *T. texanus* generó seis ecuaciones que obtuvieron valores de R^2 de 0.89 a 0.91. La especie *P. pubiflorum* obtuvo ocho ecuaciones con R^2 de 0.86 a 0.93. La variable diámetro comprimido resultó ser la variable directa que individualmente se

relacionó con el peso con base en materia seca de cada uno de los individuos muestreados, alcanzando un valor de R^2 de 0.857.

2.2 Introducción

Los agostaderos distribuidos alrededor del mundo cubren más del 50 % de la superficie terrestre, y aportan biomasa que brinda un servicio ecosistémico fundamental del cual dependen la fauna silvestre, la población y la ganadería (ILRI [International Livestock Research Institute], 2021; Jones *et al.*, 2021), la principal actividad económica en este ecosistema. En el último siglo, los agostaderos han sufrido degradación debido a episodios de sequía y sobrepastoreo por una carga animal excesiva (Mganga *et al.*, 2015; Williams & Baruc, 2000). Esto ha ocasionado un aprovechamiento deficiente del agostadero para cubrir los requerimientos de biomasa forrajera del hato ganadero (Murphy *et al.*, 2021a). Las estimaciones confiables de la cantidad de forraje disponible para el ganado son importantes para evitar el sobrepastoreo, hacer un uso adecuado del forraje y satisfacer las necesidades de los animales (Mundava *et al.*, 2014; Grüner *et al.*, 2019).

El método tradicional para estimar la producción de biomasa aérea es el de corte y pesado del pasto. Aunque este método catalogado como destructivo porque requiere hacer un corte del pasto es preciso, suele ser costoso y tardado (Murphy *et al.*, 2021b; Nafus *et al.*, 2009). Además, según Fernández (2004) la distribución heterogénea de la vegetación obliga a incrementar el número de muestras recomendada por sitio (15-20 muestras), colectadas idealmente en cada estación de crecimiento del forraje (Murphy *et al.*, 2021b).

Los métodos indirectos no destructivos, ya que no requieren cortar el pasto presente, surgen como alternativa al tradicional destructivo, que implica cortar y pesar el pasto, para determinar la biomasa aérea de forraje en el agostadero, ya que tienen la ventaja de lograr estimaciones de la biomasa de extensas superficies de una forma más rápida (Tackenberg, 2007; Butterfield & Malmström, 2009).

Métodos empíricos subjetivos de estimación visual tienen la desventaja de una alta variación en los resultados emitidos por diversas personas que lo realizan en diferentes periodos de tiempo (Andariese & Covigton, 1986). Platos o bastones

graduados han sido utilizados en décadas recientes, para estimar la biomasa forrajera en praderas con vegetación homogénea (Harmony *et al.*, 1997; Damiran *et al.*, 2007).

Nuevas metodologías para la estimación de la biomasa han sido desarrolladas mediante la utilización de imágenes satelitales (Chen *et al.*, 2021), imágenes de radar (Xu *et al.*, 2020) y a través de vehículos no tripulados (Viljanen *et al.*, 2018), sin embargo, estas son realizadas principalmente en áreas de cultivo.

Los agostaderos presentan diversos tipos de vegetación, con distribución heterogénea, por ejemplo, en el matorral espinoso tamaulipeco (MET), propio de extensas áreas geográficas del Noreste de México, predominan las especies arbustivas y semiarbustivas, que constituyen en ocasiones más del 80 % de la composición botánica, mientras que las especies gramíneas y otras hierbas difícilmente superan el 10 y 6 % respectivamente (Marroquín-Castillo *et al.*, 2016; Valdez *et al.*, 2018).

Bajo estas condiciones los modelos alométricos desarrollados a partir de relacionar los datos de producción de biomasa obtenidos del método tradicional, con las mediciones hechas en características morfológicas del individuo, son una buena opción para estimar objetivamente la biomasa de los pastos. Una vez generado el modelo, la estimación de la biomasa se puede realizar midiendo solamente las variables vegetativas necesarias, sin necesidad de cortar las plantas (Nafus *et al.*, 2009; Murphy *et al.*, 2021a).

Estudios previos han sido realizados en praderas bajo condiciones de riego y monocultivos (Damiran *et al.*, 2007; Pottier & Jabot, 2017; Mahood *et al.*, 2021). Para condiciones de agostaderos, se han publicado resultados obtenidos en condiciones áridas de Arizona (Flombaum & Sala, 2007) y de multiespecies en Argentina (Nafus *et al.*, 2009). Existen reportes de ecuaciones generadas específicamente para la estimación de la biomasa de ciertas especies de pastos, tales como las reportadas a partir de 40 plantas de praderas de pasto de *C. ciliaris* en el sur de Arizona, relacionando la biomasa, con el diámetro basal y la altura de la planta (McDonald & McPherson, 2013), así como las ecuaciones generadas

para *A. purpurea* (Sorensen *et al.*, 2012), utilizando el diámetro de la planta a diferentes alturas como variables.

En Europa se desarrolló una metodología de estimación indirecta para especies de pastos (Pottier & Jabot, 2017), que utilizó una medida denominada volumen mínimo, obtenido al juntar todos los tallos de la planta aplicando una fuerza subjetiva, no estandarizada, hasta formar un volumen mínimo.

En el presente estudio se planteó el objetivo de generar nuevas ecuaciones para estimar a partir de la medición de sus variables morfológicas, la biomasa aérea de cinco especies de pastos presentes en agostaderos de Nuevo León, México, que pudiera servir como alternativa para reemplazar la necesidad de cortar pasto como en el método tradicional.

2.3 Materiales y métodos

El estudio se realizó en un área de 132 ha de agostaderos en el municipio de Marín, Nuevo León (25° 52' 28" N; 100° 03' 24" O), en la que la precipitación varía entre 400 y 600 mm anuales, y la temperatura media de 20 a 22 °C (INEGI, 2009). El tipo de vegetación principal es de matorral espinoso tamaulipeco (MET), además de contar con áreas de pastizal inducido y agrícolas.

En enero del 2021 se establecieron de forma aleatoria en el área de estudio con vegetación propia del matorral espinoso tamaulipeco 31 parcelas de muestreo de 100 metros cuadrados (10 m x 10 m), y dentro de cada parcela se delimitaron cinco subparcelas de 1 m², en las cuales se realizó la colecta y se registró el peso verde de todos los individuos de pastos presentes en cada una de las 155 subparcelas evaluadas, en un diseño similar al utilizado previamente en áreas de agostadero (Oliveras *et al.*, 2014). Se colocó un cerco perimetral alrededor de cada parcela, para evitar disturbios. Todas las parcelas se cortaron a una altura de 3 a 5 cm al inicio del estudio. El primer muestreo se llevó a cabo del 15 de junio al 15 de julio del 2021, el segundo muestreo se realizó en otoño, del 18 de octubre al 8 de noviembre del 2021. En ambos casos el muestreo se llevó a cabo entre 30 a 40 días después de presentarse una precipitación superior a 150 mm

en el primer muestreo y de 231 mm en el caso del segundo muestreo, de acuerdo a estudios previos (González & Mendoza, 1996), la floración del pasto *Cenchrus ciliaris* ocurre entre 25 y 35 días después del rebrote a consecuencia de precipitación de 150 mm, lo que se considera como el umbral para la productividad de la especie (Martin *et al.*, 1995) durante el verano y el otoño.

En cada subparcela se muestrearon e identificaron individualmente a nivel de género y especie, todas las plantas de las gramíneas presentes. Se utilizó un flexómetro marca Truper® modelo pro-Lock FX-5M, para medir las variables descritas a continuación y mostradas en la Figura 1A:

1. Altura máxima (A): distancia entre el suelo y la parte más alta de los tallos y hojas.
2. Altura de los tallos vegetativos (Atv): distancia entre el suelo y la mayor parte de las hojas vegetativas, generalmente aquellas que no tienen espiga.
3. Diámetro basal (Db): de la circunferencia de la base de la planta.
4. Diámetro aéreo (Da): a la altura de los tallos vegetativos.
5. Utilizando un calibrador digital marca Traceable® modelo 6", se midió el diámetro comprimido (Dcomp, Figura 1) a la mitad de la altura del pasto, utilizando un prototipo experimental, por medio de una banda retráctil, aplica una presión uniforme graduada de 2 kg en los tallos vegetativos (Figura 2).
6. Utilizando las variables morfológicas de la Figura 1A, se calculó la cobertura aérea en forma circular (COBAC), cobertura aérea en forma elipsoidal (COBAE), cobertura basal circular (COBBC) y cobertura basal elipsoidal (COBBE). Los volúmenes de cilindro (en sus modalidades CIL 1 a CIL 6), y cono (en modalidades CON 1 a CON 6), señalados en la Figura 1B, se basaron en propuestas previas (Johnson *et al.*, 1988).

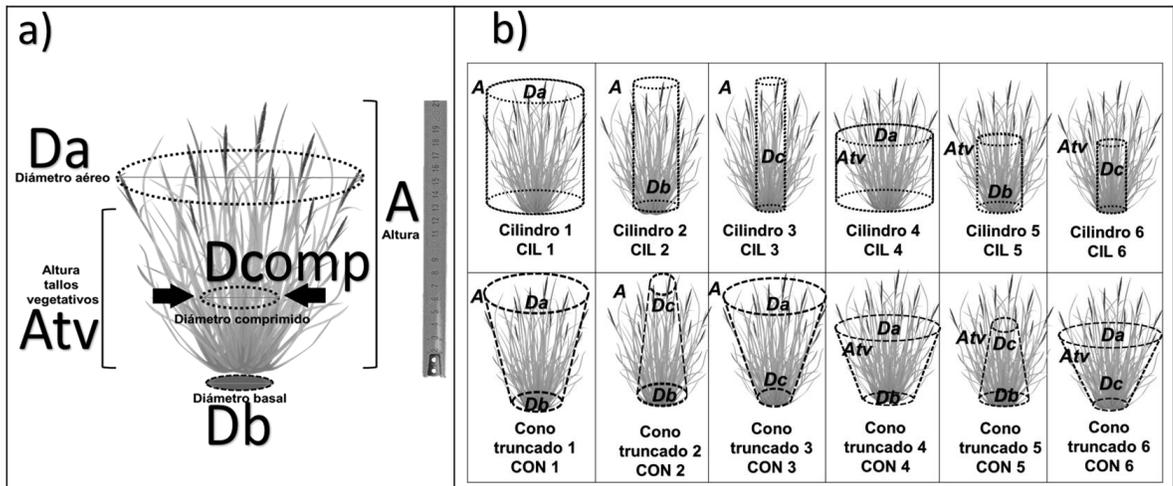


Figura 1. Variables medidas en las plantas de pastos (a) y formas de volúmenes estimados. (b) A = altura; Atv = altura de tallos vegetativos; Db = diámetro basal; $Dcomp$ = diámetro comprimido; Da = diámetro aéreo.

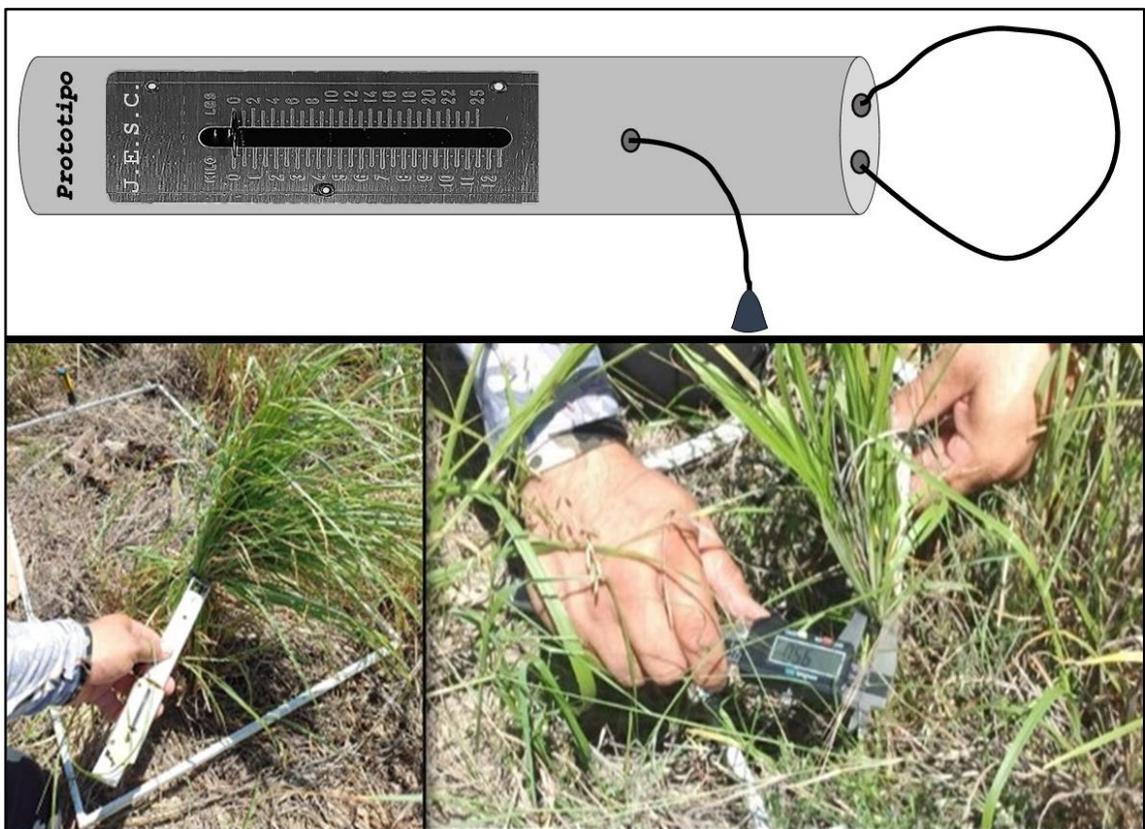


Figura 2. Prototipo desarrollado para controlar la fuerza con la que se comprimen los individuos de especies gramíneas para su medición.

Cada una de las 745 plantas muestreadas, fue identificada, medida y cortada con tijeras de mano a nivel del suelo, para registrar su peso verde (g) en campo, y se almacenó en bolsa de papel Kraft. Posteriormente las muestras se llevaron a laboratorio y secadas en una estufa de aire forzado a 60°C hasta llegar a peso constante, con el fin de obtener su peso seco (g), utilizando una báscula con capacidad de 500 g con división mínima de 0.1 g (marca Torrey, modelo Lab-500).

Las plantas colectadas fueron de las cinco especies de pastos presentes en el área de estudio: *Cenchrus ciliaris* (n=424 individuos), *Pappophorum bicolor* (n=125 individuos), *Aristida purpurea* (n=107 individuos), *Tridens texanus* (n=59 individuos) y *Paspalum pubiflorum* (n=30 individuos), para la generación de ecuaciones.

Un total de 21 variables independientes: diámetro aéreo, diámetro basal, diámetro comprimido, altura, altura de los tallos vegetativos, cobertura basal circular, cobertura basal elíptica, cobertura aérea circular, cobertura aérea elíptica, volumen cilindro 1, volumen cilindro 2, volumen cilindro 3, volumen cilindro 4, volumen cilindro 5, volumen cilindro 6, volumen cono 1, volumen cono 2, volumen cono 3, volumen cono 4, volumen cono 5, volumen cono 6; y una variable dependiente: biomasa, fueron sometidas a análisis de regresión lineal, de pasos sucesivos (Nafus *et al.*, 2009) y regresión no lineal (logarítmico, inverso, cuadrático, cúbico, potencia, exponencial) en el software IBM SPSS, para generar ecuaciones de predicción de biomasa tanto de forma general para todas las especies y de forma específica para cada especie.

Para evaluar la calidad de la estimación de la biomasa lograda con las nuevas ecuaciones generales y específicas, se realizaron comparaciones de cada uno de los valores registrados en el muestreo destructivo, con los valores pronosticados de cada una de las ecuaciones. Se procedió a calcular el coeficiente de determinación de la regresión (R^2) (Oliveras *et al.*, 2014), el error estándar (EE) (Johnson *et al.*, 1988), la correlación de Pearson (r) (Viljanen *et al.*,

2018), la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) (Pottier & Jabot, 2017) y el criterio de información de Akaike (AIC) (Oliveras *et al.*, 2014).

2.4 Resultados

Los pastos *Cenchrus ciliaris* y *Paspalum pubiflorum* presentaron valores superiores de cobertura aérea y basal, diámetro aéreo y basal, peso verde y seco ($P < 0.05$) al resto de las especies (Tabla 1). *Cenchrus ciliaris* registró un mayor valor promedio de peso seco por individuo al de *Aristida purpurea* y *Tridens texanus* ($P < 0.05$), mientras que *Paspalum pubiflorum* y *Pappophorum bicolor* obtuvieron valores intermedios.

De las 21 variables obtenidas en el muestreo, la variable diámetro comprimido fue la que tuvo mayor relación directa con el peso seco observado ($R^2 = 0.857$), solo la variable peso verde que no se utilizó en la generación de ecuaciones obtuvo una mayor relación ($R^2 = 0.929$) (Figura 3).

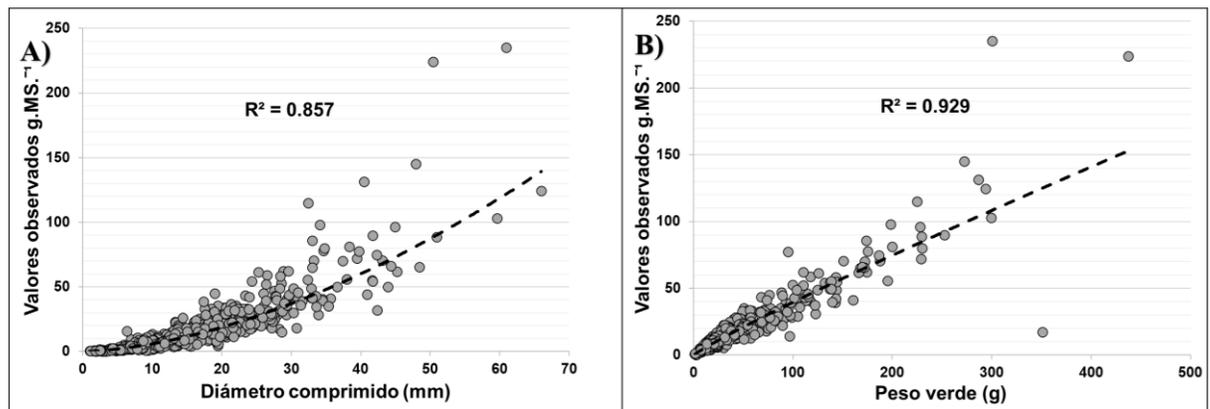


Figura 3. Regresión de los valores pronosticados y los valores observados. Relación entre la variable diámetro comprimido y el peso seco de cada uno de los pastos evaluados (A). Relación entre el peso verde y el peso seco de los pastos evaluados (B).

Las estimaciones de biomasa aérea calculadas con las nuevas ecuaciones generales generadas constaron de 11 ecuaciones lineales (I-XI), tres ecuaciones potenciales (XII-XIV) y una ecuación cubica (XV), obteniendo coeficientes de determinación (R^2) que variaron entre 0.77 y 0.90, mientras que el coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.88 a 0.94. La raíz del error cuadrático medio

normalizado (NRMSE) varió de 0.68 a 0.48 y el criterio de información de Akaike (AIC) tomo valores de 3553 a 3079 (Tabla 2).

Tabla 1. Valores promedio de cobertura aérea, cobertura basal, diámetro aéreo, diámetro basal, diámetro comprimido, altura máxima, altura de los tallos vegetativos, peso verde y peso seco por individuo de cada especie.

Especie	Cobertura		Diámetro			Altura		Peso	
	Aérea (cm ²)	Basal (cm ²)	Aéreo (cm)	Basal (cm)	Comprimido (mm)	Máxima (cm)	Tallos vegetativos (cm)	Verde (g)	Seco (g)
<i>Cenchrus ciliaris</i>	729 ^{ab}	190 ^a	28 ^a	14 ^a	19 ^a	52 ^a	27 ^a	53 ^a	22 ^a
<i>Pappophorum bicolor</i>	355 ^{bc}	52 ^{bc}	20 ^{bc}	8 ^{bc}	13 ^{abc}	52 ^a	23 ^{ab}	15 ^{bcd}	10 ^{ab}
<i>Aristida purpurea</i>	277 ^{bc}	29 ^c	17 ^{cd}	6 ^c	9 ^{bcd}	45 ^{ab}	20 ^{bc}	7 ^{cd}	5 ^b
<i>Tridens texanus</i>	208 ^c	37 ^{bc}	16 ^{cd}	6 ^c	6 ^d	34 ^{cd}	16 ^c	5 ^d	3 ^b
<i>Paspalum pubiflorum</i>	799 ^a	104 ^{abc}	30 ^a	11 ^{ab}	13 ^{ab}	40 ^{bc}	23 ^{ab}	48 ^{ab}	13 ^{a^b}

Diferentes letras dentro de la misma columna indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

La ecuación I es un modelo lineal, que incorpora la medida del cono 6 (Figura 1B), el cual es calculado a partir de tres variables directas: diámetro aéreo, diámetro comprimido y altura de los tallos vegetativos, sus estimaciones tienen un R^2 de 0.77, $r = 0.88$, $NRMSE = 0.64$, $AIC = 3469$ (Figura 4).

Las estimaciones calculadas con la ecuación VI (lineal) a partir de los datos generados por las variables diámetro aéreo, diámetro comprimido, altura y altura de los tallos vegetativos, tienen un R^2 de 0.87, $r = 0.93$, $NRMSE = 0.49$, $AIC = 3108$ (Figura 4). La ecuación IX (lineal) incorpora los datos de las cinco variables medidas para calcular estimaciones que tienen un R^2 de 0.88, $r = 0.94$, $NRMSE = 0.48$, $AIC = 3079$ (Figura 4).

Las ecuaciones no lineales XII ($R^2=0.86$, $r = 0.88$, $NRMSE = 0.67$, $AIC = 3530$), XIII ($R^2=0.89$, $r = 0.88$, $NRMSE = 0.68$, $AIC = 3553$) y XIV ($R^2=0.90$, $r = 0.88$, $NRMSE = 0.67$, $AIC = 3530$), son del modelo de potencia y utilizan menor cantidad de variables. Las estimaciones calculadas utilizando la ecuación XII, que utiliza el diámetro comprimido como única variable tienen un $R^2=0.86$ (Figura 4). La ecuación XIII utiliza el cilindro 3, calculado a partir del diámetro comprimido y de la altura de la planta, para estimar biomasa aérea de pastos obtuvo un $R^2=0.89$. La ecuación XIV utiliza el cilindro 6 (Figura 1B), conseguido a partir del diámetro comprimido y la altura de los tallos vegetativos resultó con $R^2=0.90$ (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones alométricas generales para la estimación de biomasa aérea de pastos.

ID	Ecuación	R ²	EE	R Pearson	NRMSE	AIC
I	$Y = 0.9648 + 0.0026\text{CON6}$	0.77	10.1	0.88	0.64	3469
II	$Y = 1.2602 + 0.0015\text{CON6} + 0.0423\text{CIL3}$	0.84	8.4	0.92	0.53	3196
III	$Y = 3.4057 + 0.0025\text{CON6} + 0.0406\text{CIL3} - 0.0142\text{COBAC}$	0.85	8.2	0.92	0.52	3168
IV	$Y = -1.1229 + 0.0027\text{CON6} + 0.0235\text{CIL3} - 0.0198\text{COBAC} + 0.5648\text{Dcomp}$	0.86	7.9	0.93	0.50	3125
V	$Y = 2.6456 + 0.0032\text{CON6} + 0.0179\text{CIL3} - 0.0243\text{COBAC} + 0.7285\text{Dcomp} - 0.2369\text{Atv}$	0.86	7.9	0.93	0.50	3115
VI	$Y = 2.5343 + 0.0027\text{CON6} + 0.0139\text{CIL3} - 0.0295\text{COBAC} + 0.8253\text{Dcomp} - 0.2595\text{Atv} + 0.0002\text{CIL1}$	0.87	7.8	0.93	0.49	3108
VII	$Y = 2.4619 + 0.0028\text{CON6} + 0.0121\text{CIL3} - 0.0325\text{COBAC} + 0.9079\text{Dcomp} - 0.2756\text{Atv} + 0.0003\text{CIL1} - 0.0006\text{CON2}$	0.87	7.7	0.93	0.48	3092
VIII	$Y = 1.5473 + 0.0030\text{CON6} + 0.0145\text{CIL3} - 0.0388\text{COBAC} + 0.8100\text{Dcomp} - 0.3252\text{Atv} + 0.0003\text{CIL1} - 0.0014\text{CON2} + 0.5200\text{Db}$	0.87	7.6	0.93	0.48	3084
IX	$Y = 1.2159 + 0.0032\text{CON6} + 0.0447\text{CIL3} - 0.0421\text{COBAC} + 0.8939\text{Dcomp} - 0.3478\text{Atv} + 0.0003\text{CIL1} - 0.0253\text{CON2} + 0.5790\text{Db} + 0.0084\text{CIL2}$	0.88	7.5	0.94	0.48	3079
X	$Y = -0.2126 + 0.7078\text{LNCIL6}$	0.78	0.4	0.88	0.67	3530
XI	$Y = -2.0976 + 0.5412\text{LNCIL6} + 0.2661\text{LNCON1}$	0.82	0.3	0.90	0.60	3374
XII	$Y = 0.1213 * \text{Dcomp}^{1.6818}$	0.86	0.4	0.88	0.67	3530
XIII	$Y = 0.4473 * \text{CIL3}^{0.7288}$	0.89	0.4	0.88	0.68	3553
XIV (6)	$Y = 0.8084 * \text{CIL6}^{0.7078}$	0.90	0.4	0.88	0.67	3530
XV	$Y = 1.1886 + (0.0029\text{CON6}) + (-5.909 \times 10^{-9}\text{CON6}) + (1 \times 10^{-12}\text{CON6})$	0.80	9.5	0.89	0.60	3387

$n=745$; Da = Diámetro aéreo; Db =Diámetro basal; $Dcomp$ = Diámetro comprimido; A = Altura; C = Constante; $CON6$ = Cono 6; $CIL3$ = Cilindro 3; $COBAC$ = Cobertura aérea circular; Atv = Altura de los tallos vegetativos; $CIL1$ = Cilindro 1; $CON2$ = Cono 2; $CIL2$ = Cilindro 2; LN = Logaritmo natural; $CIL6$ = Cilindro 6; $CON1$ = Cono 1. Y = Biomasa aérea; R^2 = Coeficiente de determinación; EE =Error estándar; r = Coeficiente de correlación de Pearson; $NRMSE$ = Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado; AIC = Criterio de Información de Akaike. Todos los coeficientes de regresión fueron significativos ($P<0.05$).

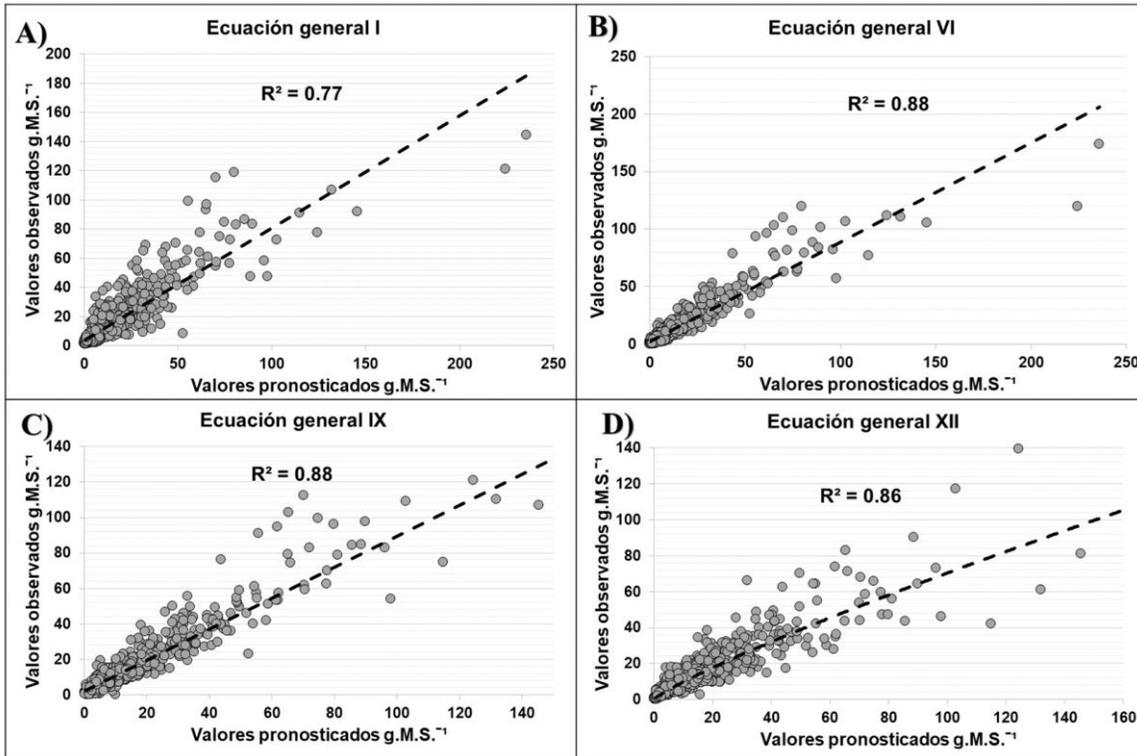


Figura 4. Relación entre los valores observados y los valores pronosticados por las ecuaciones generales. A) Ecuación general III, B) Ecuación general VI, C) Ecuación general IX (diámetro comprimido) y D) Ecuación general XII. Todas las gráficas fueron ajustadas a cero.

Se generaron ocho ecuaciones de modelo lineal específicamente para estimar la biomasa aérea de la especie *Cenchrus ciliaris* arrojando valores de R^2 de 0.87 hasta 0.91. Los valores de r (Pearson) variaron de 0.89 a 0.94. Para NRMSE se registraron cifras de 0.54 a 0.40 y AIC de 1744 a 1603 (Tabla 3). En el caso específico de la ecuación VI generada para *Cenchrus ciliaris* se logró un buen ajuste de los valores estimados de biomasa aérea, con R^2 de 0.88, $r = 0.94$, NRMSE= 0.40, AIC= 1603, utilizando las cinco variables medidas (Figura 5).

Las ecuaciones generadas específicamente para *Pappophorum bicolor* todas de modelo lineal obtuvieron valores de R^2 de 0.85 hasta 0.87. Los valores de r (Pearson) variaron de 0.91 a 0.92. Para NRMSE se registraron valores de 0.32 a 0.29 y AIC de 320 a 287 (Tabla 3). Los resultados estimados utilizando las cinco variables con la ecuación específica II para la especie *Pappophorum bicolor* (Tabla 3) tuvieron un ajuste de $R^2 = 0.86$, $r = 0.92$, NRMSE= 0.29 y AIC= 287 (Figura 5).

Tabla 3. Ecuaciones alométricas específicas de estimación de biomasa aérea para las especies *Cenchrus ciliaris* y *Pappophorum bicolor*.

	ID	Ecuación	R ²	EE	R Pearson	NRMSE	AIC
<i>Cenchrus ciliaris</i> n= 424	I	$Y = -5.6497 + 0.0062\text{CON6} + 0.0589\text{CIL3} - 0.0562\text{COBAC} + 1.2195\text{Dcomp} - 0.0845\text{CON5} + 0.0274\text{CIL5} + 0.0631\text{COBBC}$	0.87	9.4	0.93	0.42	1612
	II	$Y = 0.1097 + 0.0067\text{CON6} + 0.0550\text{CIL3} - 0.0607\text{COBAC} + 1.3446\text{Dcomp} - 0.0849\text{CON5} + 0.0277\text{CIL5} + 0.0587\text{COBBC} - \text{Atv} \cdot 0.2833$	0.87	9.4	0.93	0.42	1613
	III	$Y = 0.1862 + 0.0060\text{CON6} + 0.0389\text{CIL3} - 0.0642\text{COBAC} + 1.3591\text{Dcomp} - 0.0638\text{CON5} + 0.0201\text{CIL5} + 0.0633\text{COBBC} - 0.2864\text{Atv} + 0.0002\text{CIL1}$	0.87	9.3	0.93	0.41	1619
	IV	$Y = 0.4812 + 0.0039\text{CON6} + 0.0381\text{CIL3} - 0.0725\text{COBAC} + 1.4015\text{Dcomp} - 0.059\text{CON5} + 0.0221\text{CIL5} + 0.0893\text{COBBC} - 0.3199\text{Atv} + 0.0021\text{CIL1} - 0.0033\text{CON1}$	0.88	9.1	0.94	0.40	1610
	V	$Y = 0.3244 + 0.0028\text{CON6} - 0.0210\text{CIL3} - 0.0766\text{COBAC} + 1.4844\text{Dcomp} - 0.0735\text{CON5} + 0.0267\text{CIL5} + 0.0916\text{COBBC} - 0.3343\text{Atv} + 0.0023\text{CIL1} - 0.0032\text{CON1} + 0.1270\text{CIL6}$	0.88	9.0	0.94	0.40	1612
	VI	$Y = 0.2862 + 0.0032\text{CON6} - 0.0753\text{COBAC} + 1.4623\text{Dcomp} - 0.0767\text{CON5} + 0.0279\text{CIL5} + 0.0902\text{COBBC} - 0.3257\text{Atv} + 0.0022\text{CIL1} - 0.0032\text{CON1} + 0.0931\text{CIL6}$	0.88	9.0	0.94	0.40	1603
	VII	$Y = -2.6215 + 0.5313\text{LNCIL3} + 0.3087\text{LNCON4}$	0.79	0.3	0.89	0.54	1735
	VIII	$Y = -2.8827 + 0.5270\text{LNCIL3} + 0.2460\text{LNCON4} + 0.2602\text{LNAtv}$	0.79	0.3	0.89	0.54	1744
<i>Pappophorum bicolor</i> n=125	I	$Y = 1.5975 + 0.0502\text{CIL3} + 0.0048\text{CON5} + 0.0002\text{CON3}$	0.85	3.1	0.92	0.29	293
	II	$Y = 2.1060 + 0.0490\text{CIL3} + 0.0050\text{CON5} + 0.0002\text{CON3} - 0.0050\text{COBBE}$	0.85	3.0	0.92	0.29	287
	III	$Y = -2.1551 + 0.4551\text{LNCIL3} + 0.2962\text{LNCON4}$	0.83	0.3	0.91	0.32	311
	IV	$Y = -1.6864 + 0.4908\text{LNCIL3} + 0.5508\text{LNCON4} - 0.2798\text{LNCIL1}$	0.83	0.3	0.91	0.32	320

Dcomp= Diámetro comprimido; *Atv*= Altura de los tallos vegetativos; *Db*= Diámetro basal; *Da*= Diámetro aéreo; *CON1*= Cono 1; *CON2*= Cono 2; *CON4*= Cono 4; *CON5*= Cono 5; *CON6*= Cono 6; *COBBE*= Cobertura basal elíptica; *COBBC*= Cobertura basal circular; *COBAC*= Cobertura aérea circular; *COBAC*= Cobertura aérea elíptica; *LN*= Logaritmo natural; *CIL1*= Cilindro 1; *CIL2*= Cilindro 2; *CIL3*= Cilindro 3; *CIL5*= Cilindro 5; *CIL6*= Cilindro 6. *Y*= Biomasa aérea; *R*²= Coeficiente de determinación; *EE*=Error estándar; *r*= Coeficiente de correlación de Pearson; *NRMSE*= Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado; *AIC*= Criterio de Información de Akaike. Todos los coeficientes de regresión fueron significativos (*P*<0.05).

Para la especie *Aristida purpurea* se generaron cuatro ecuaciones lineales (I-IV) y una de modelo potencial (V), arrojando valores de R^2 de 0.89 hasta 0.92. Los valores de r (Pearson) variaron de 0.94 a 0.96. Para NRMSE se registraron valores de 0.33 a 0.27 y AIC tomó valores de 101 a 87 (Tabla 4). La mejor ecuación para *Aristida purpurea*, fue la ecuación III (Tabla 4), cuyas estimaciones a partir de las cinco variables medidas tuvieron un ajuste con un coeficiente de determinación de 0.92, $r=0.96$, NRMSE= 0.27 y AIC= 87 (Figura 5).

En el caso de la especie *Tridens texanus*, se generó una ecuación lineal (I), tres ecuaciones cúbicas (II, IV y VI) y dos ecuaciones cuadráticas (III y V), con valores de R^2 de 0.89 hasta 0.91. Los valores de r (Pearson) variaron de 0.94 a 0.96. Para NRMSE se registraron valores de 0.34 a 0.30 y AIC de -1 a -18 (Tabla 4). La ecuación con mejor ajuste fue la IV, que utiliza un modelo cúbico con la variable cilindro 3, calculada a partir de la altura de la planta y el diámetro comprimido, cuyo ajuste fue de R^2 de 0.91, $r=0.96$, NRMSE= 0.30 y AIC= -18 (Figura 5).

Las ecuaciones para la especie *Paspalum pubiflorum* fueron dos lineales (I y II), una cuadrática (III) y dos cúbicas (IV y V), resultando con valores de R^2 de 0.88 hasta 0.93. Los valores de r (Pearson) variaron de 0.93 a 0.97. Para NRMSE se registraron valores de 0.34 a 0.24 y AIC de 75 a 57 (Tabla 4). La mejor ecuación fue la IV, que utiliza la variable cilindro 3, calculada a partir de la altura de la planta y el diámetro comprimido en un modelo cúbico, cuyas estimaciones tuvieron un ajuste de R^2 de 0.93, $r=0.97$, NRMSE= 0.24 y AIC=57 (Figura 5).

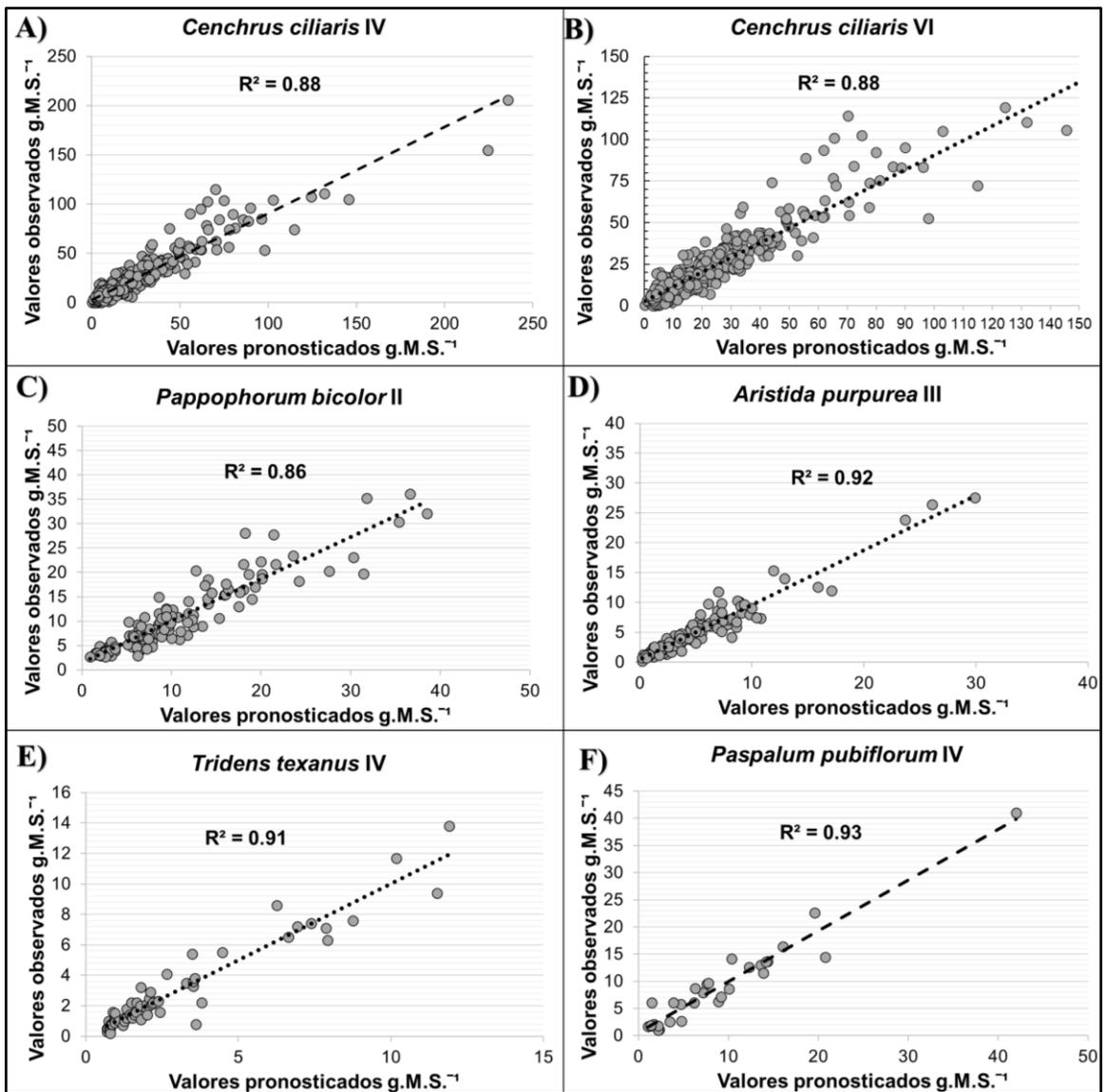


Figura 5. Relación entre valores observados y valores pronosticados de las ecuaciones específicas para *Cenchrus ciliaris* (A y B), *Pappophorum bicolor* (C), *Aristida purpurea* (D), *Tridens texanus* (E) y *Paspalum pubiflorum* (F).

Tabla 4. Ecuaciones alométricas específicas de estimación de biomasa aérea para las especies *Aristida purpurea*, *Tridens texanus* y *Paspalum pubiflorum*.

	ID	Ecuación	R ²	EE	R Pearson	NRMSE	AIC
<i>A purpurea</i> n=107	I	$Y = -0.3326 + 0.1498CIL6 + 0.1438Da + 0.0012CON2$	0.90	1.6	0.95	0.29	101
	II	$Y = 0.2787 + 0.1420CIL6 + 0.1336Da + 0.0046CON2 - 0.0759COBBC$	0.91	1.5	0.95	0.28	93
	III	$Y = -0.6641 + 0.1138CIL6 + 0.1257Da + 0.0046CON2 - 0.0816COBBC + 0.1951Dcomp$	0.92	1.5	0.96	0.27	87
	IV	$Y = -1.1069 + 0.6448LNCIL6 + 0.3590LNDa$	0.90	0.3	0.95	0.29	101
	V	$Y = 0.7305 * CIL6^{0.7290}$	0.89	0.3	0.94	0.33	99
<i>Tridens texanus</i> n=59	I	$Y = 0.6314 + 0.1407CIL3$	0.91	0.9	0.95	0.30	-16
	II	$Y = 1.0669 + (-0.3668 * Dcomp) + (0.0986 * Dcomp) + (-0.0022 * Dcomp)$	0.89	1.0	0.94	0.34	-1
	III	$Y = 0.6701 + (0.1346 * CIL3) + (0.0001 * CIL3)$	0.91	0.9	0.95	0.30	-16
	IV	$Y = 0.5474 + (0.1672 * CIL3) + (-0.0012 * CIL3) + (1.18 \times 10^{-5} * CIL3)$	0.91	0.9	0.96	0.30	-18
	V	$Y = 0.5982 + (0.3271 * CIL6) + (-0.0014 * CIL6)$	0.89	1.0	0.95	0.33	-6
	VI	$Y = 0.7585 + (0.2410 * CIL6) + (0.0049 * CIL6) + (-0.0001 * CIL6)$	0.90	1.0	0.95	0.32	-8
<i>Paspalum pubiflorum</i> n=30	I	$Y = -0.3363 + 0.0971CIL3 + 0.0058COBAE$	0.90	2.8	0.95	0.30	71
	II	$Y = 0.0227 + 0.0901CIL3 + 0.0426COBAE - 0.0352COBAC$	0.91	2.6	0.96	0.27	74
	III	$Y = 2.5527 + (0.0874 * CIL3) + (0.0002 * CIL3)$	0.88	3.0	0.94	0.31	75
	IV	$Y = -0.0371 + (0.2744 * CIL3) + (-0.0020 * CIL3) + (6 \times 10^{-6} * CIL3)$	0.93	2.3	0.97	0.24	57
	V	$Y = -1.7699 + (0.0034 * CON6) + (-2.5 \times 10^{-7} * CON6) * (8 \times 10^{-12} * CON6)$	0.86	3.3	0.93	0.34	71

Dcomp= Diámetro comprimido; Atv= Altura de los tallos vegetativos; Db= Diámetro basal; Da= Diámetro aéreo; CON1= Cono 1; CON2= Cono 2; CON4= Cono 4; CON5= Cono 5; CON6= Cono 6; COBBE= Cobertura basal elíptica; COBBC= Cobertura basal circular; COBAC= Cobertura aérea circular; COBAE= Cobertura aérea elíptica; LN= Logaritmo natural; CIL1= Cilindro 1; CIL2= Cilindro 2; CIL3= Cilindro 3; CIL5= Cilindro 5; CIL6= Cilindro 6, Y= Biomasa aérea; R²= Coeficiente de determinación; EE=Error estándar; r= Coeficiente de correlación de Pearson; NRMSE= Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado; AIC= Criterio de Información de Akaike;

2.5 Discusión

Las ecuaciones lineales y polinómicas generadas a partir del muestreo de medidas vegetativas y de la biomasa, permiten estimar la biomasa aérea de gramíneas presentes en el agostadero, con alto grado de precisión.

Las nuevas ecuaciones alométricas obtenidas, resultaron con valores de R^2 de 0.77 a 0.93 superiores a los reportados de R^2 de 0.25 a 0.85 para estimaciones de ecuaciones generales para dos gramíneas y dos pseudogramíneas en los Andes Peruanos (Oliveras *et al.*, 2014). Ecuaciones alométricas generadas en Chubut, Argentina (Flombaum & Sala, 2007), evaluando 50 individuos de tres especies de gramíneas, tuvieron valores de R^2 de entre 0.72 y 0.86, similares a las de este estudio.

El número de parcelas establecidas fue similar al utilizado por Oliveras *et al.* (2014), sin embargo, el tamaño fue diferente, nuestras parcelas de 100 m², mientras que las de ellos de 4 m². Además, en cada una de las 31 parcelas registramos los valores de composición botánica, medidas vegetativas y biomasa de las gramíneas presentes en cinco subparcelas. Con ello se tuvo mayor confiabilidad de las mediciones registradas y de los promedios calculados, para la generación de las ecuaciones.

La especie *C. ciliaris* posee presencia importante en la vegetación de gramíneas observada en el agostadero evaluado, ya que representó el 57 % del número total (n=745) de individuos colectados y su biomasa el 80 %. En las áreas evaluadas, el pasto *C. ciliaris* se estableció por dispersión natural, dejando en evidencia su alto potencial para establecerse en los agostaderos en México (Siller-Clavel *et al.*, 2022). La especie nativa con mayor presencia fue *Pappophorum bicolor*, se registró 125 individuos, su biomasa representó el 11 % de la biomasa total (Tabla 1).

El diámetro comprimido fue la variable incluida en el 100 % de las ecuaciones alométricas generales y en el 97 % de las ecuaciones específicas, tanto para el modelo lineal como no lineal. La altura de los tallos vegetativos fue incluida en el 87 % de las ecuaciones generales. Las variables altura de los tallos vegetativos

y la altura de la planta fueron empleadas en el 71 % de las ecuaciones específicas. Estas variables han sido directamente relacionadas con la densidad del forraje (Barnetson *et al.*, 2020). Johnson *et al.* (1988) reportaron en praderas con condiciones óptimas para su desarrollo, la variable cobertura vegetal como la que mejor puede estimar indirectamente la biomasa. Mahood *et al.* (2021) determinaron que la cobertura vegetal es un buen predictor para la estimación de biomasa, con R^2 de hasta 0.89 en comunidades vegetales de *Bromus tectorum*.

Una metodología de estimación indirecta implementada para especies de pastos del oeste de Europa (Pottier & Jabot, 2017), utilizó como variable una medida denominada volumen mínimo, consistente en juntar manualmente todos los tallos de la planta hasta formar un volumen mínimo; sin embargo, la fuerza aplicada fue subjetiva, variando de acuerdo con la persona que realizara la medición e incluso podría variar cuando la misma persona ejerce diferente presión por cansancio al hacer repetidamente el muestreo. El dispositivo de compactación utilizado en el presente trabajo aplicando la misma fuerza de compresión generó mayor certidumbre en los resultados obtenidos.

Los valores de NRMSE calculados en cada una de las nuevas ecuaciones generadas determinan la dispersión de los datos estimados respecto a los datos observados, siendo 0 el ajuste ideal (Soto-Bravo & Gonzalez-Lutz, 2019). En contraste con ello, el criterio de Akaike compara y selecciona de entre un grupo de modelos de predicción que utilizan los mismos datos experimentales, el más adecuado para pronosticar los valores esperados en comparación con los valores observados, que en este caso debería ser el modelo con el menor valor AIC (Martinez *et al.*, 2009; Cavanaugh & Neath, 2019). Los valores de NRMSE y AIC son de gran utilidad en la selección de los mejores modelos.

La ecuación específica generada para *Cenchrus ciliaris* tuvo un valor de $R^2= 0.87$, similar al R^2 de 0.82 reportado por McDonald & McPherson (2013), al formar ecuaciones alométricas relacionando la biomasa con la medición del diámetro basal y la altura de 40 plantas de praderas de pasto de *C. ciliaris* en el sur de Arizona. La ecuación obtenida para *A. purpurea* resultó con un $R^2= 0.89$, similar

a los reportados por Sorensen et al. (2012) para la especie *A. purpurea* con un R^2 de 0.82 a 0.90, utilizando el diámetro de la planta a diferentes alturas. Johnson et al. (1988) generaron ecuaciones para estimar biomasa aérea a partir del análisis de 93 plantas de *Agropyron desertorum*, reportaron coeficientes de variación de 0.76 a 0.88, ligeramente inferiores a los del presente estudio. Las nuevas ecuaciones generadas en este estudio son candidatas potenciales para sustituir la fase de corte, secado y pesado que se realiza en el método tradicional (INIFAP, 2011).

El desarrollo de ecuaciones alométricas con aplicación en agostadero es de suma importancia para lograr un manejo sustentable del ecosistema (Oliveras et al., 2014). Los muestreos de vegetación no destructivos tienen ventajas con relación al tiempo y presupuesto respecto al muestreo tradicional, además permiten el monitoreo del crecimiento a nivel de individuo (Mills et al., 2016; Pottier & Jabot, 2017).

3 CAPÍTULO 2.- EVALUACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y CALIDAD NUTRICIONAL DE PASTOS EN AGOSTADEROS

4 RESUMEN

La determinación de la producción y de la calidad nutricional de los forrajes del agostadero contribuye a lograr un manejo eficiente y sostenible del ganado. El objetivo del presente estudio fue determinar la biomasa aérea y la composición química de seis especies de gramíneas presentes en cinco sitios ecológicos de un agostadero en Marín, Nuevo León. Muestras representativas de cada especie fueron colectadas entre junio y octubre del 2021, posteriormente analizadas para determinar sus contenidos de proteína, cenizas, grasa, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), hemicelulosa, celulosa y lignina. Los resultados fueron evaluados con un ANOVA. La producción anual de biomasa aérea fue superior ($p < 0.001$) para el sitio METVA e inferior en los sitios METLO, VSMETLO y VSMETLLA. Las especies *Pappophorum bicolor*, *Aristida purpurea* y *Cenchrus ciliaris* aportaron la mayor cantidad de biomasa en el sitio METLO ($p > 0.05$). En los sitios METVA, MeLLA y VSMETLO *Cenchrus ciliaris* registró la mayor proporción ($p < 0.05$) de biomasa aérea, mientras que en el sitio VSMETLLA fueron *Cenchrus ciliaris* y *Paspalum pubiflorum*. *Paspalum pubiflorum* registró mayor contenido ($p < 0.001$) de proteína cruda, menores contenidos ($p < 0.001$) de FDN y FDA. *Aristida purpurea* y *Pappophorum bicolor* obtuvieron los valores inferiores de proteína y los superiores de FDN y FDA ($p < 0.001$). La mejor calidad nutricional fue registrada en *Paspalum pubiflorum*, *Cenchrus ciliaris* y *Chloris sp.* La biomasa forrajera registrada corresponde a coeficientes de agostadero que varían desde 7 hasta 56 hectáreas necesarias para mantener una unidad animal entre los sitios evaluados.

4.1 Introducción

A nivel mundial, más del 40 % de la superficie corresponde a ecosistemas de agostaderos, que proveen forraje de vegetación nativa o naturalizada base de la ganadería extensiva (Kumar *et al.*, 2015; Sosa-Montes, 2021). En México los agostaderos cubren aproximadamente 57 % del territorio nacional, y se estima que cerca del 43 % de este ecosistema ha sido degradado (Esqueda *et al.*, 2011) debido a disturbios causados por mal manejo, por sobrepastoreo, que han derivado en incremento de la aridez y mayor frecuencia de sequías asociadas al cambio climático, lo que pone en riesgo la sostenibilidad de los agostaderos (Oñatibia *et al.*, 2020; Ramoelo & Cho, 2018).

Cuando los agostaderos son pastoreados, es de vital importancia mantener al menos una cantidad del 50 % de forraje en pie para preservar las condiciones del suelo, vigor de la planta, calidad de la dieta, y asegurar alimento para la fauna silvestre (Holechek, 1988). Para cumplir estas recomendaciones, es importante monitorear periódicamente la producción forrajera en constante cambio debido a variaciones climáticas y productivas propias de estos ecosistemas, de tal forma que se puedan realizar ajustes de carga animal para lograr una producción eficiente y sostenible en el agostadero, de acuerdo con la cantidad y calidad nutricional del forraje disponible (Murphy *et al.*, 2021; Barnettson *et al.*, 2020).

El método tradicional para estimar la producción forrajera en un agostadero es el de corte, pesado y secado, que es preciso, aunque costoso y lento (Nafus *et al.*, 2009). Durante los trabajos para realizarlo, se pueden obtener muestras de forraje para analizar y determinar en laboratorio su contenido de materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutra y fibra detergente ácido (Coleman *et al.*, 2004). Al conocer la cantidad y calidad del forraje producido se determina el estado nutricional de los animales y esto permite programar un plan adecuado de suplementación en caso de ser necesario. También contribuye a seleccionar los pastos de mayor importancia para repoblar en las zonas degradadas.

El objetivo del estudio fue estimar la productividad de diferentes sitios ecológicos del agostadero y evaluar la composición química de los pastos presentes; bajo la

hipótesis planteada que la producción de biomasa aérea y la composición química de los pastos son diferentes entre los sitios ecológicos del agostadero.

4.2 Materiales y métodos

El estudio se realizó en un agostadero de 132 ha, localizado en Marín, Nuevo León, México (25°52'28"N; 100° 03'24"O), región caracterizada por tener una precipitación anual de 600 a 620 mm (Fick & Hijmans, 2017), con variaciones interanuales de precipitación desde 229 hasta 722 mm anuales (Martínez-López *et al.*, 2014). El tipo de vegetación dominante es el matorral espinoso tamaulipeco (MET), que colinda con áreas de pastizal inducido y de uso agrícola (INEGI, 2016) (Figura 6).

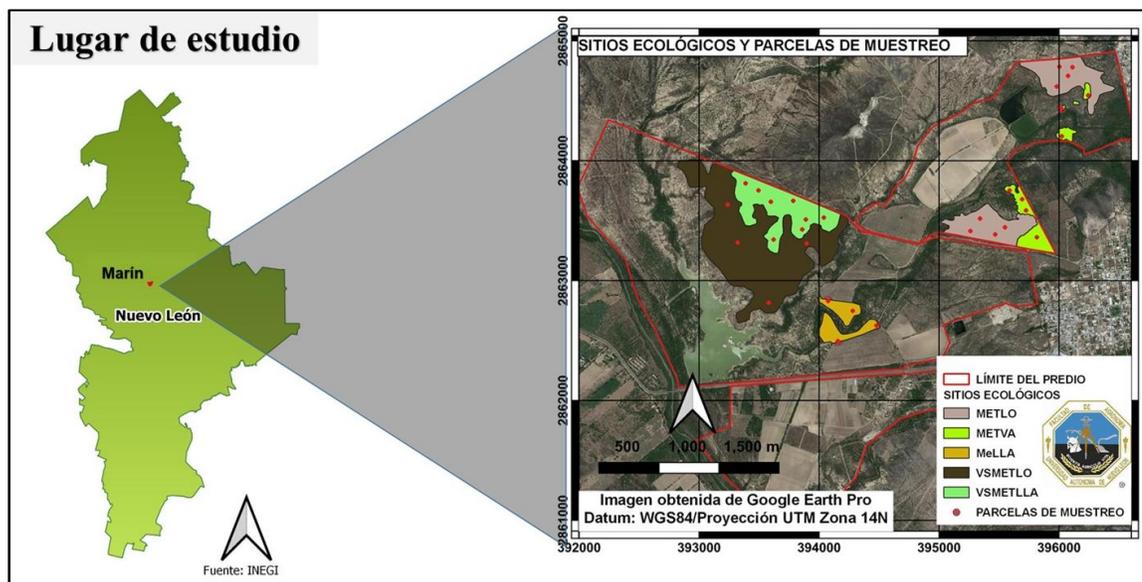


Figura 6. Área de estudio, sitios ecológicos y parcelas de muestreo.

Empleando cartas topográficas, edafológicas, de uso de suelo y vegetación, imágenes de satélite y topografía se delimitaron cinco sitios ecológicos de agostadero con características distintivas de superficie, altitud, tipo de vegetación, topografía y pendiente (Tabla 5), ubicados en un área con un radio menor a 1.5 km (Copernicus, 2021; INEGI, 2012; INEGI, 2019; INEGI, 2007).

El sitio 1 fue nombrado METLO, al poseer una vegetación de matorral espinoso tamaulipeco y una topografía de lomerío (Figura 7).



Figura 7. Sitio METLO (Matorral Espinoso Tamaulipeco en lomerío).

El sitio 2 fue llamado METVA, al caracterizarlo una vegetación de matorral espinoso tamaulipeco y una topografía de valle (Figura 8).



Figura 8. Sitio METVA (Matorral Espinoso Tamaulipeco en valle).

El sitio 3 denominado MeLLA al tener una vegetación de mezquital con una topografía de llanura (Figura 9).



Figura 9. Sitio MeLLA (mezquital en llanura).

El sitio 4 fue nombrado VSMETLO al registrar una vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco con topografía de lomerío (Figura 10).



Figura 10. Sitio VSMETLO (vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco en lomerío).

El sitio 5 fue designado VSMETLLA, al tener una vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco en llanura (Figura 11).



Figura 11. Sitio VSMETLLA (vegetación secundaria de matorral espinoso tamaulipeco en llanura).

Un total de 31 parcelas de muestreo con un tamaño de 100 m² (10 m x 10 m), fueron distribuidas aleatoriamente en todos los sitios, geo-posicionadas mediante el uso de un GPS y orientadas hacia el norte magnético mediante una brújula. Dentro de cada parcela se establecieron cinco subparcelas de muestreo de 1 m² (2 m x 0.5 m), cuatro de ellas ubicadas en las esquinas a 2 metros de cada orilla y una en el centro, en las cuales se llevó a cabo el muestreo (Figura 12). Todos los pastos presentes dentro de las parcelas fueron cortados en enero del 2021 a una altura aproximada de 3 cm, para iniciar el registro del forraje acumulado en el año. Se colocó un cerco de púas en cada una de las parcelas para evitar cualquier disturbio.

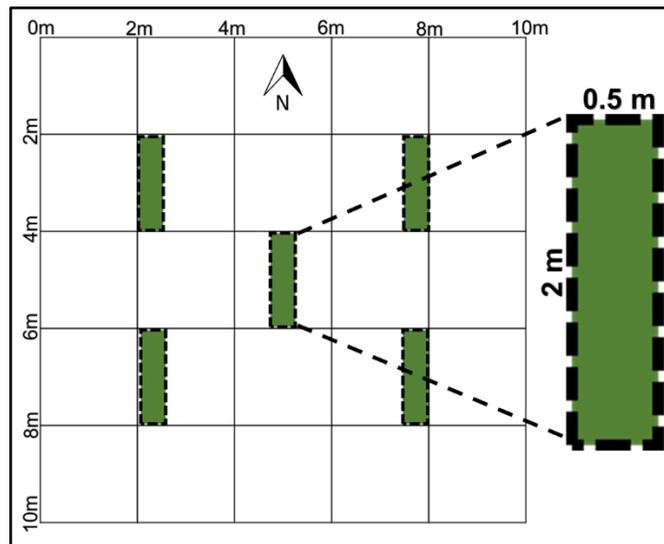


Figura 12. Distribución de las subparcelas de muestreo dentro de la parcela.

Tabla 5. Características de los sitios del agostadero.

Sitio	Superficie (ha)	Altitud (msnm)	Tipo de vegetación	Tipo de suelo	Topoforma	Pendiente (%)
METLO	19.1	360 - 390	MET	Feozem calcárico- regosol	Lomerío	3
METVA	9.6	370 - 385	MET	Feozem calcárico- regosol	Valle de loma	1 - 2
MeLLA	9	350	Mezquital	Rendzina-litosol	Llano	1 - 2
VSMETLO	69.8	345 - 355	Secundaria de MET	Feozem calcárico- regosol	Lomerío	1 - 2
VSMETLLA	24.6	350 - 360	Secundaria de MET	Feozem calcárico- regosol	Llano	1 - 2

ha= hectárea; msnm= metros sobre el nivel del mar; MET= Matorral Espinoso Tamaulipeco.

En el año 2021, dos muestreos fueron llevados a cabo de 30 a 40 días después de la ocurrencia de una precipitación mayor a 150 mm, para conocer la producción y composición química de la biomasa (Martin *et al.*, 1995). El primer muestreo se efectuó del 15 de junio al 15 de julio del 2021, cosechando la biomasa producida en los meses de enero-junio, después de 150 días con una precipitación de 150 mm. Del 18 de octubre al 8 de noviembre del 2021 fue realizado el segundo muestreo, después de una precipitación de 231 mm, cosechando la biomasa de forraje acumulada en el periodo de julio a octubre, correspondiente a 120 días. En las subparcelas se cortaron con tijeras de mano a nivel del suelo todos los individuos pertenecientes a especies gramíneas, los cuales se identificaron, almacenaron en bolsas de papel kraft y se pesaron (peso húmedo) en campo. Posterior a esto, fueron secadas en una estufa de aire forzado a 60°C hasta llegar a peso constante y se obtuvo su peso en base a materia seca, utilizando una báscula con capacidad de 5 kg y precisión de 0.1 g (Torrey Lab-500, México), previa calibración con una pesa patrón de 147.5 g.

La producción de biomasa de la unidad muestral se calculó utilizando las siguientes fórmulas:

$$BAUM (kgMS ha^{-1}) = \frac{10,000 \times \sum(SppA + SppB + \dots SppN) (g)}{1000 g}$$

donde:

BAUM= Biomasa aérea de la unidad muestral expresada en kg de materia seca por hectárea ($kg MS ha^{-1}$).

SppA= Cantidad de biomasa aérea de la especie A en la unidad muestral, expresado en g de materia seca.

SppB= Cantidad de biomasa aérea de la especie B en la unidad muestral, expresado en g de materia seca.

SppN= Cantidad de biomasa aérea de la especie N en la unidad muestral, expresado en g de materia seca.

Para obtener la biomasa aérea de la parcela (BAP) de muestreo se utilizó:

$$BAP \text{ (kg MS ha}^{-1}\text{)} = \frac{\sum(BAS1 + BAS2 + BAS3 + BAS4 + BAS5) \text{ (kg MS ha}^{-1}\text{)}}{5}$$

donde:

BAP= Biomasa aérea de la parcela de muestreo expresado en $kg MS ha^{-1}$

BAS1= Biomasa aérea de la subparcela 1 expresado en $kg MS ha^{-1}$

BAS2= Biomasa aérea de la subparcela 2 expresado en $kg MS ha^{-1}$

BAS3= Biomasa aérea de la subparcela 3 expresado en $kg MS ha^{-1}$

BAS4= Biomasa aérea de la subparcela 4 expresado en $kg MS ha^{-1}$

BAS5= Biomasa aérea de la subparcela 5 expresado en $kg MS ha^{-1}$

Se analizó la composición química de las especies de pastos que aportaron al menos el 5 % de la producción total en cada uno de los muestreos, para lo cual se elaboraron muestras compuestas del forraje obtenido de cada una de las especies analizadas, en cada uno de los muestreos. Cada muestra fue molida en un molino Wiley y cribada a través de un tamiz de 1 mm, se realizó de acuerdo con la metodología AOAC (2005). Los contenidos de fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y lignina se determinaron de acuerdo con la metodología propuesta por Van Soest et al. (1991). Por diferencia se calcularon los valores de hemicelulosa (FDN – FDA) y celulosa (FDA – Lignina) (Gezahagn *et al.*, 2016). Una vez determinada la composición química de las muestras colectadas en cada uno de los dos muestreos, y considerando el aporte de materia seca de cada especie, se calculó el promedio ponderado anual de la composición química para cada una de las parcelas y cada uno de los sitios. Los contenidos de proteína cruda, FDN, FDA y lignina fueron utilizados para estimar la calidad nutricional de los pastos (Hamid *et al.*, 2020; Coleman *et al.*, 2004; Barnettson *et al.*, 2020).

Cuando los datos cumplieron con los criterios de normalidad y homocedasticidad en las variables de productividad y de composición química, se analizaron con el

software estadístico SPSS mediante un análisis de varianza con un modelo completamente al azar ($p < 0.05$). A las variables que presentaron diferencias significativas, se les aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$).

4.3 Resultados

En el periodo de enero a junio, la producción acumulada de biomasa expresada en kg MS ha^{-1} , fue mayor ($p < 0.001$) en los sitios METVA y MeLLA, mientras que los sitios METLO y VSMETLO presentaron la menor producción. Para el periodo de julio a octubre la mayor producción de biomasa fue registrada en el sitio METVA y la menor producción ($p < 0.001$) se obtuvo en los sitios VSMETLO, VSMETLLA y METLO. La producción de biomasa acumulada en el año fue superior ($p < 0.001$) para el sitio METVA e inferior en los sitios METLO, VSMETLO y VSMETLLA (Figura 13).

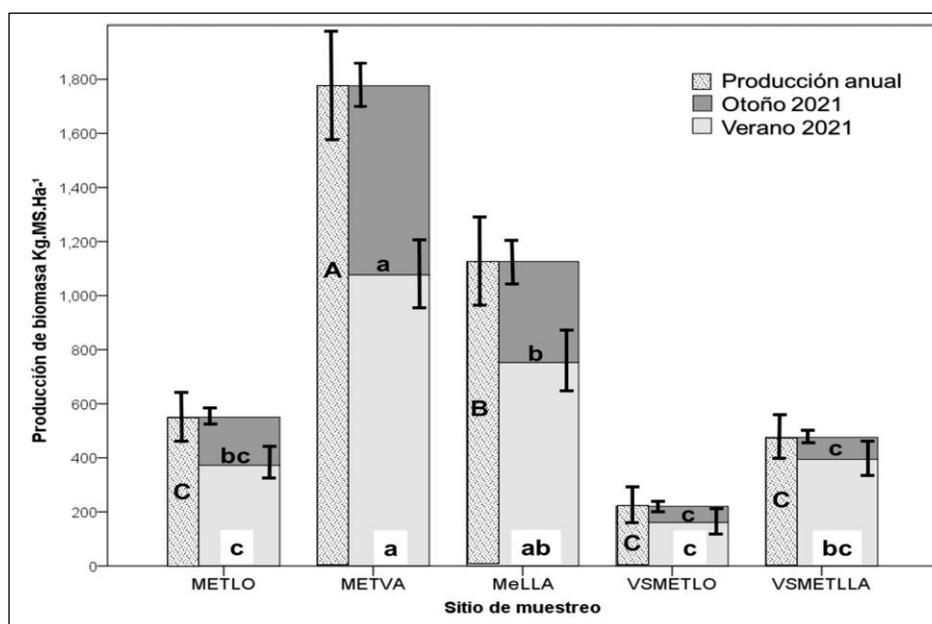


Figura 13. Producción de biomasa (kg MS ha^{-1}) por sitio de agostadero. Letras diferentes entre columnas indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

Considerando la producción anual acumulada, en el sitio METLO las especies en el sitio *Pappophorum bicolor*, *Aristida purpurea*, *Cenchrus ciliaris* y *Tridens texanus* aportaron 33, 27, 20 y 6 % respectivamente del total, el 14 % restante fue de otros pastos ($p > 0.05$). En los sitios METVA, MeLLA y VSMETLO *Cenchrus*

ciliaris registró el 90, 91 y 76 %, respectivamente, con ello la mayor proporción ($p < 0.05$) del total de la biomasa en cada uno de estos sitios. En el sitio VSMETLLA *Cenchrus ciliaris* registró los porcentajes superiores ($p < 0.05$) de biomasa, mientras que los valores de proporción de biomasa registrados para los pastos *P. bicolor* y *Chloris sp.* fueron similares ($p > 0.05$) a los de *P. pubiflorum* (Figura 14).

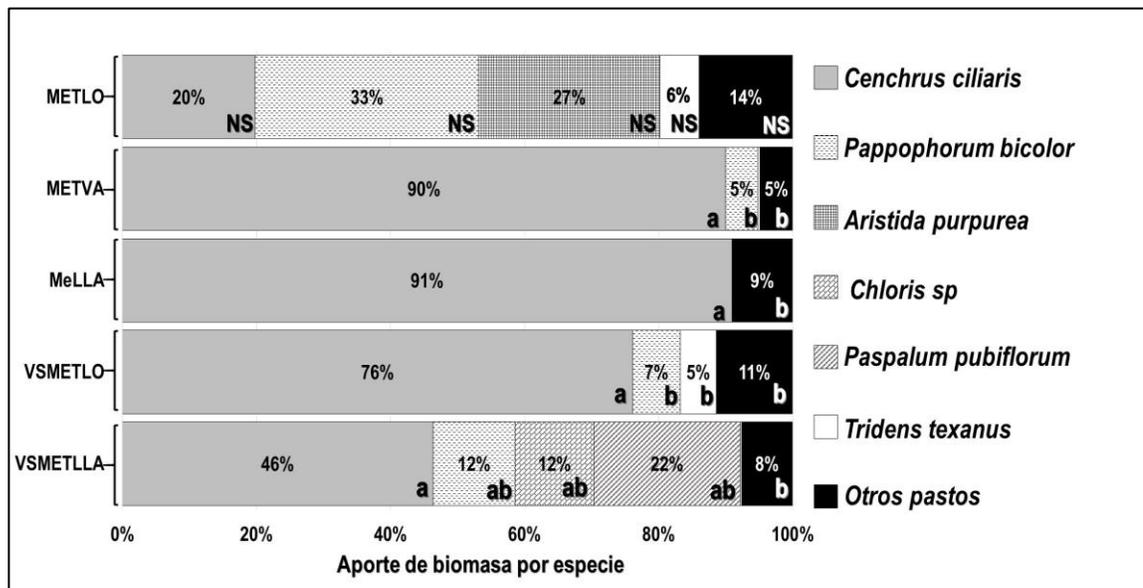


Figura 14. Aporte de biomasa forrajera anual acumulada de las especies por sitio. Diferentes letras indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

De las cuatro especies analizadas en el muestreo correspondiente al período de enero a junio, el pasto *Paspalum pubiflorum* presentó mayor contenido ($p < 0.001$) de proteína cruda y la menor cantidad ($p < 0.001$) de FDN y de FDA (Tabla 7), *Cenchrus ciliaris* también registró el menor contenido de FDA. *Aristida purpurea* y *Pappophorum bicolor* tuvieron los valores inferiores ($p < 0.001$) de proteína y los superiores de FDN y FDA.

El pasto *Aristida purpurea* resultó con los contenidos más altos ($p < 0.001$) de hemicelulosa, celulosa y lignina, y el más bajo contenido de cenizas (Tabla 7). En contraste, *Paspalum pubiflorum* obtuvo contenidos bajos ($p < 0.001$) de las fracciones de fibra y el contenido más alto ($p < 0.001$) de cenizas.

Tabla 6. Composición química de las especies de pastos en dos épocas del año.

	Cenizas	Proteína Cruda	Grasa Cruda	FDN	FDA	Lignina	Hemicel.	Celulosa
Enero – Junio								
<i>Aristida purpurea</i>	6.69 d	5.39 c	1.94 NS	77.37 a	54.47 a	9.98 a	22.90 a	44.48 a
<i>Cenchrus ciliaris</i>	11.13 b	8.00 b	1.83 NS	69.38 b	44.99 b	6.42 c	24.38 a	38.57 b
<i>Pappophorum bicolor</i>	8.94 c	7.25 bc	2.08 NS	75.36 a	54.81 a	9.47 a	20.54 b	45.33 a
<i>Paspalum pubiflorum</i>	13.75 a	13.50 a	2.01 NS	58.76 c	46.13 b	7.82 b	12.63 c	38.31 b
<i>EEM</i>	0.508	0.558	0.145	0.695	0.589	0.272	0.499	0.595
<i>Valor P</i>	<0.001	<0.001	>0.05	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Julio – Octubre								
<i>Aristida purpurea</i>	7.16 b	6.04 d	1.47 NS	81.38 a	46.54 a	7.45 NS	34.84 a	39.09 a
<i>Cenchrus ciliaris</i>	12.61 a	8.64 ab	1.42 NS	69.41 c	39.39 bc	5.79 NS	30.02 b	33.60 ab
<i>Chloris sp</i>	9.37 b	6.18 cd	1.46 NS	69.44 c	36.65 c	5.60 NS	32.79 ab	31.05 b
<i>Pappophorum bicolor</i>	8.15 b	6.50 cd	1.46 NS	75.84 b	44.00 ab	6.12 NS	31.84 ab	37.88 a
<i>Tridens texanus</i>	8.03 b	9.88 a	1.45 NS	74.72 b	41.04 abc	5.91 NS	33.68 ab	35.13 ab
<i>EEM</i>	0.41	0.35	0.01	0.81	0.68	0.16	0.42	0.60
<i>Valor P</i>	0.001	0.001	0.071	0.001	0.003	0.185	0.017	0.005

FDN= Fibra detergente neutro; FDA= Fibra detergente ácido; Hemicel. = Hemicelulosa. Diferentes letras indican diferencia significativa. NS= No significativo; EEM= Error estándar de la media; P= Probabilidad.

El contenido más bajo ($p < 0.001$) de lignina fue registrado en el pasto *Cenchrus ciliaris* (Tabla 7). El contenido de grasa cruda fue similar ($p > 0.05$) entre las cuatro especies de pastos del período enero-junio.

En el período julio a octubre se analizaron cinco especies de pastos cuya presencia fue superior al 5% de la biomasa total: *A. purpurea*, *C. ciliaris*, *Chloris sp.*, *P. bicolor* y *T. texanus*. Las de mayor contenido de proteína ($p < 0.001$) fueron *Tridens texanus* y *Cenchrus ciliaris*, mientras que *Aristida purpurea* fue la especie con menor ($p < 0.001$) contenido de proteína, mayor contenido ($p < 0.003$) de FDN, de FDA, de hemicelulosa y celulosa (Tabla 7). *Cenchrus ciliaris* y *Chloris sp.* tuvieron los más bajos ($p < 0.003$) contenidos de FDN y FDA, valores bajos ($p < 0.05$) de hemicelulosa y celulosa. Los contenidos de lignina y de grasa cruda fueron similares ($p > 0.05$) en las cinco especies analizadas de pastos, y el contenido de cenizas fue superior ($p < 0.001$) en *C. ciliaris* (Tabla 7).

La composición química de cada uno de los sitios fue calculada considerando la proporción de biomasa aportada por cada especie. El promedio ponderado del contenido de proteína cruda del forraje acumulado en un año fue mayor ($p < 0.01$) para el sitio VSMETLLA y menor ($p < 0.01$) para METLO. El contenido promedio ponderado anual de FDN del sitio METLO fue superior ($p < 0.001$) al de los sitios METVA, MeLLA y VSMETLLA (Tabla 8). El contenido promedio ponderado anual de FDA y de lignina fue inferior ($p < 0.004$) para los sitios METVA y MeLLA, mientras que el valor calculado para el sitio METLO fue el más alto ($p < 0.004$).

El contenido promedio ponderado anual de hemicelulosa fue mayor ($p < 0.05$) para el sitio VSMETLO y el menor para el sitio VSMETLLA (Tabla 8), mientras que el contenido ponderado anual de celulosa fue superior ($p < 0.05$) para el sitio METLO que para el sitio METVA (Tabla 8). Los promedios ponderados de grasa cruda y de lignina fueron similares para los cinco sitios evaluados del agostadero.

Tabla 7. Promedio ponderado de la composición química de los pastos por sitio de agostadero.

	Periodo	METLO	METVA	MeLLA	VSMETLO	VSMETLLA	Valor	
							P	EEM
Producción kg MS ha ⁻¹	E-J	372 c	1076 a	752 ab	161 c	394 bc	0.001	77.35
	J-N	178 bc	700 a	374 b	60 c	82 c	0.001	46.66
	Anual	550 c	1776 a	1126 b	221 c	476 c	0.001	73.65
% Proteína Cruda	E-J	6.22 b	7.91 ab	8.00 ab	8.25 a	9.15 a	0.001	0.39
	J-N	7.38 b	8.34 ab	8.64 ab	8.86 a	8.22 ab	0.047	0.30
	Anual	6.68 b	8.08 ab	8.22 ab	8.42 ab	8.99 a	0.002	0.36
% Grasa Cruda	E-J	1.92 NS	1.86 NS	1.83 NS	1.80 NS	1.87 NS	0.340	0.04
	J-N	1.45 NS	1.43 NS	1.42 NS	1.43 NS	1.45 NS	0.123	0.01
	Anual	1.75 NS	1.67 NS	1.69 NS	1.68 NS	1.82 NS	0.052	0.03
% FDN	E-J	75.75 a	70.20 b	69.38 b	71.45 ab	67.98 b	0.001	1.04
	J-N	77.12 a	70.35 b	69.41 b	71.62 b	70.53 b	0.001	0.94
	Anual	76.25 a	70.27 b	69.39 b	71.55 ab	68.39 b	0.001	1.01
% FDA	E-J	52.48 a	46.20 b	44.99 b	45.84 b	46.30 b	0.001	1.14
	J-N	43.78 a	40.05 b	39.39 b	40.29 b	40.06 a	0.001	0.58
	Anual	49.21 a	43.57 b	43.07 b	44.10 ab	45.46 ab	0.004	1.03
% Lignina	E-J	9.19 a	6.80 b	6.42 b	6.83 b	7.34 b	0.001	0.34
	J-N	6.62 a	5.84 b	5.79 b	5.85 b	5.91 b	0.001	0.10
	Anual	8.21 a	6.37 b	6.20 b	6.49 b	7.16 ab	0.001	0.27
% Hemicelulosa	E-J	23.27 NS	23.99 NS	24.38 NS	25.60 NS	21.84 NS	0.217	0.95
	J-N	33.35 a	30.29 b	30.02 b	31.34 ab	30.49 b	0.002	0.55
	Anual	27.04 ab	26.69 ab	26.31 ab	27.44 a	23.07 b	0.019	0.88
% Celulosa	E-J	43.28 a	39.40 ab	38.57 b	39.01 b	38.97 b	0.004	0.83
	J-N	37.16 a	34.22 b	33.60 b	34.43 b	34.15 b	0.001	0.51
	Anual	40.99 a	37.20 ab	36.87 b	37.61 ab	38.29 ab	0.013	0.78

Diferentes letras indican diferencia significativa. E-J= Enero a Junio; J-O= Julio a Octubre; EEM= Error estándar de la media; NS= No Significativa; P= Probabilidad

4.4 Discusión

Los resultados obtenidos mostraron notorias diferencias en la composición química y en la producción de biomasa entre los cinco sitios ecológicos del agostadero, esto contribuye a orientar los trabajos de manejo de los sitios, para mejorar su utilización y la producción sostenible. Entre las medidas de manejo del agostadero que pueden ser implementadas, Pedroza-Parga et al. (2022) reportaron que utilizando 10 ton ha⁻¹ de residuos de cosecha de maíz como cobertura vegetal, en combinación con siembra de 10 kg ha⁻¹ de semilla de pasto *Cenchrus ciliaris* mejoró de 533 a 1678 kg MS ha⁻¹ la producción de materia seca del pasto en agostaderos de zonas áridas de Durango, México, especialmente cuando esto se combina con el efecto benéfico de la precipitación pluvial, que estimula de manera significativa el crecimiento de los pastos (Martin *et al.*, 1995).

Considerando los resultados del presente estudio con una utilización del 40% de la biomasa presente para cada uno de los sitios del estudio (Holechek, 1988), se procedió a calcular los coeficientes de agostadero, se obtuvieron para los sitios METLO, METVA, MeLLA, VSMETLO y VSMETLLA valores de 22, 7, 11, 56 y 26 hectáreas respectivamente, necesarias para sostener una unidad animal al año (ha/UA/año). Es importante en este aspecto considerar que en tres de los sitios evaluados: METLO, VSMETLO y VSMETLLA, los coeficientes de agostadero resultantes contrastan con los coeficientes de entre 13 y 18 ha/U.A./año, reportados por COTECOCA (1978) para el área.

Martínez-López et al. (2014) reportan para praderas establecidas de *Cenchrus ciliaris* bajo condiciones de temporal una producción de biomasa con variaciones de 4,573 a 10,257 kg MS ha⁻¹ en áreas adyacentes al área del presente estudio. Por lo anterior, es evidente la importancia de estimar con regularidad la producción de biomasa en los diferentes sitios del agostadero, debido a que el desarrollo de la vegetación responde a factores como la topografía, suelo, presión de pastoreo y las condiciones ambientales específicas de la zona (Hoover *et al.*, 2021; Muir *et al.*, 2011).

De esta forma se puede disminuir el riesgo de sobrepastoreo, como el reportado por Zárate (2012) en un área de protección de flora y fauna en el estado de Sonora, México, en donde definieron áreas con más de 230 % de sobrepastoreo. La precipitación es uno de los principales factores que afecta la tasa de crecimiento y por lo tanto la producción de los agostaderos (Gómez *et al.*, 2007), sin embargo, dado que el presente estudio se realizó en un área de 132 ha, se puede asumir que las condiciones de precipitación pluvial fueron similares para los sitios evaluados.

La especie con mayor presencia en los sitios resultó ser *Cenchrus ciliaris*, una especie introducida que ha incrementado su importancia económica en zonas áridas, debido a su calidad forrajera, buena productividad y su tolerancia a la sequía (Jackson, 2005; Mohamed y Mohamed, 2021).

El contenido de fibra detergente neutro (FDN) es indicativo de la proporción de pared celular, formada principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, y determina en gran medida la calidad nutricional, la digestibilidad y el consumo voluntario, en los pastos utilizados como forraje (Gezahagn *et al.*, 2016; Barnetson *et al.*, 2020). Los resultados obtenidos, resaltan la importancia de llevar a cabo determinaciones paralelas de producción y de calidad nutricional de biomasa en condiciones de agostadero, ya que, dependiendo de las especies de pasto dominantes en un sitio, se tendrá la composición química del forraje disponible para los animales en pastoreo.

Además, los resultados de composición química de cada una de las especies de pastos analizadas fueron diferentes según la estación del año, especialmente en aspectos de las fracciones de fibra FDN, FDA y Lignina, así como de sus componentes hemicelulosa y celulosa. Es decir, factores como la especie de pasto, la etapa fisiológica en la que se encuentran y las condiciones ambientales en las que se desarrollan las plantas, pueden influir en el crecimiento y la proporción de pared celular (Pietruszka, 2020; Coleman *et al.*, 2004).

También las características fisiográficas del terreno parecen determinar en gran medida la producción y composición química de la biomasa presente en cada

uno de los sitios del agostadero. El sitio VSMETLLA registró una baja producción de biomasa, pero el forraje colectado tuvo contenido alto de proteína y bajo de FDN. En cambio, el sitio METLO tuvo una producción de biomasa (kg MS/ha) similar a la del sitio VSMETLLA, pero con forraje de menor contenido de proteína y mayor contenido de FDN. El sitio METVA produjo la mayor cantidad de forraje, con contenido aceptable de FDN y de proteína cruda. El sitio VSMETLO produjo la menor cantidad de biomasa por ha, de los cinco sitios evaluados, los contenidos de proteína y de FDN fueron intermedios respecto a la de los demás.

El contenido de grasa cruda del forraje fue similar entre los cinco sitios evaluados, pero en el caso de FDA, lignina, hemicelulosa y celulosa, se registraron variaciones importantes, que no parecen tener una asociación estrecha con la producción de biomasa. La vegetación presente en lomerío y en llanos con suelo Feozem tienen una producción menor que la vegetación que se desarrolla en valle de loma con el mismo tipo de suelo y en llanos con suelo Rendzina.

El contenido de proteína cruda (6 %), hemicelulosa (34.8 %) y lignina (7.5 %) registrado en *A. purpurea* en el muestreo del período julio-octubre, es similar al reportado por Ramírez et al. (2001) de 6 %, 40.8 % y 9.1 % respectivamente. Sin embargo, el valor de FDN fue 9 % menor y el de celulosa fue 14 % mayor. Los datos nutricionales de *C. ciliaris* son similares a los reportados por Ramírez et al. (2004) y por Bernal et al. (2022). Ramírez et al. (1995) analizaron muestras obtenidas de una fístula esofágica de borregos pastando praderas de *C. ciliaris*, en donde los animales seleccionaban su dieta a libre acceso y reportaron un contenido superior de proteína de 13 %.

Lee et al. (2011) y Muir et al. (2011) reportan niveles de proteína cruda para *P. bicolor* similares a los de este estudio, lo que permite considerar a esta especie de pasto como una especie con características forrajeras adecuadas para agostaderos en el noreste de México. La especie *Paspalum pubiflorum* creció en el período de enero-junio en proporciones notables del sitio VSMETLLA, destacó por su alto contenido de proteína cruda y el bajo contenido de las fracciones de fibra FDN y FDA. Matta et al. (2022) analizaron 25 accesiones del género

Paspalum durante dos años, citan un promedio de 14.9 % de proteína cruda. Baréa et al. (2007) reportaron para la especie *Paspalum dilatatum* de 10.7 a 18.6 % de proteína cruda, así como de 40.6 a 46.8 % de FDA, datos similares a los del presente estudio. Sin embargo, el contenido de FDN para *Paspalum pubiflorum* fue en promedio 15 % menor al contenido de entre 66.4 y 71.8 % de FDN reportado por Baréa et al. (2007), lo que confirma la alta calidad nutricional de la biomasa de esta especie de pasto en los agostaderos del noreste de México.

La composición química de los pastos analizados corresponde a un valor forrajero de bueno a excelente según lo reportado por Guzmán-Lucio et al. (2016) y Vásquez et al. (2001) para *Cenchrus ciliaris*, *Chloris spp*, *Paspalum spp* y *Tridens texanus*. Los resultados de composición química reportados para *P. bicolor* y *A. purpurea*, concuerdan con un valor forrajero de regular a pobre según lo indicado por Guzmán-Lucio et al. (2016) y Valdés (2015). La determinación de la composición química de las especies de pastos de los agostaderos permite orientar medidas de manejo del pastizal tendientes a establecer la proporción de cada especie deseable (composición botánica) en cada sitio. Es conocido que los animales tienen preferencias de pastoreo y son capaces de seleccionar las plantas o parte de plantas que consumen con base en restricciones fisiológicas o ambientales (Parsons et al., 1994).

El contenido de nutrientes para la biomasa de forraje de los sitios es similar a los reportados por Gutiérrez et al. (2019) para pastizales con coeficiente de agostadero de 4 ha/UA/año en el estado de Chihuahua, México, mencionan que muestras obtenidas por fístula esofágica, contenían en promedio anual 9.9 % de P.C., 71.4 % de FDN, 43.9 % de FDA y 27.5 % de hemicelulosa. Reyes et al. (2014) señalan, que a partir de muestras colectadas por fístula ruminal, la dieta en bovinos en pastizal mediano arbosufrutescente del Estado de Durango, México, tuvo un promedio anual de 6.9 % de proteína cruda, 71.6 de FDN, 52.8 % de FDA y 18.8 % de hemicelulosa.

5 CONCLUSIONES

Se desarrollaron ecuaciones de predicción a partir de 21 variables relacionadas con las características morfológicas de los pastos, generando 15 ecuaciones generales y 28 específicas (*Cenchrus ciliaris*= 8, *Pappophorum bicolor*= 4, *Aristida purpurea*= 5, *Tridens texanus*= 6 y *Paspalum pubiflorum*= 5), las cuales son una alternativa confiable para estimar indirectamente la biomasa aérea de los pastos de los agostaderos del noreste de México, de forma más práctica y menos costosa que el método tradicional.

Las ecuaciones de modelo lineal fueron las que obtuvieron un mejor ajuste en las ecuaciones generales y específicas de las especies *Cenchrus ciliaris*, *Pappophorum bicolor* y *Aristida purpurea*. El modelo no lineal se ajustó mejor para las especies *Tridens texanus* y *Paspalum pubiflorum*.

La producción de biomasa difiere entre sitios ecológicos del agostadero, por lo que es necesario determinarla de forma específica en cada uno de los sitios donde pastorea el ganado sobre todo en aquellos que difieren de topografía, aunque las especies de pastos se distribuyen en diferentes proporciones en los sitios, la especie *Cenchrus ciliaris* se presentó ampliamente distribuida en el agostadero, aportando una proporción significativa de la biomasa forrajera total.

La composición química y calidad nutricional de los pastos presentes en el agostadero difieren entre las especies, la especie *Aristida purpurea* fue la de menor calidad forrajera. Las especies *Paspalum pubiflorum*, *Cenchrus ciliaris* y *Chloris sp* resultaron con la mejor calidad nutricional. Los sitios del agostadero presentaron diferente contenido nutricional, los de menor calidad nutricional fueron los ubicados en la topografía de lomerío.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Allen, L. R., Stewart-Moore, N., Byrne, D., & Allen, B. L. (2016). Guardian dogs protect sheep by guarding sheep, not by establishing territories and excluding predators. *Animal Production Science*, 57(6), 1118-1127.
- Andariese, S. W., & Covington, W. W. (1986). Biomass estimation for four common grass species in northern Arizona ponderosa pine. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 39(5), 472-473.
- AOAC. (2005). Official Methods of Analysis. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, USA.
- Baréa, K., Scheffer-Basso, S.M., Dall'Agnol, M. & Oliveira, B.N. (2007). Management of *Paspalum dilatatum* Poir. biotype Virasoro. 1. Production, chemical composition and persistence. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36, 992-999.
- Barnetson, J., Phinn, S. & Scarth, P. (2020). Estimating plant pasture biomass and quality from UAV imaging across Queensland's Rangelands. *AgriEngineering*, 2(4), 523-543.
- Bernal, H., Perrusquía, V.M., Vásquez, N.C. & González, H. (2022). Determinación de la producción de gas *in vitro*, contenido de nutrientes y energía metabolizable de forrajes y suplementos para ovinos y caprinos. *Ciencia UANL*, 25(115): 41-47.
- Butterfield, H. S. & Malmström, C. M. (2009). The effects of phenology on indirect measures of aboveground biomass in annual grasses. *International Journal of Remote Sensing*, 30(12), 3133-3146.
- Cavanaugh, J.E. & Neath, A.A. (2019). The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. Wiley Interdisciplinary Reviews: *Computational Statistics*, 11(3):e1460.
- Chen, Y., Guerschman, J., Shendryk, Y., Henry, D. & Harrison, M.T. (2021). Estimating Pasture Biomass Using Sentinel-2 Imagery and Machine Learning. *Remote Sens*, (13):603.

- Chen, J., Gu, S., Shen, M., Tang, Y., & Matsushita, B. (2009). Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*, 30(24), 6497-6517.
- Coleman, S.W., Moore, J.E., & Wilson, J.R. (2004). Quality and utilization. *Warm-season (C4) grasses*, 45, 267-308.
- Copernicus Sentinel data. (2020). Retrieved from ASF DAAC september 21 of 2020, processed by ESA.
- COTECOCA Comisión Técnica Consultiva para la determinación de los Coeficientes de Agostadero. (1978). Coeficientes de agostadero del estado de Nuevo León.
- Damiran, D., DelCurto, T., Darambaza, r E., Clark, A. A., Kennedy, P. L., & Taylor R. (2007). Visual obstruction: weight technique for estimating production on northwestern bunchgrass prairie rangelands. In: Proceedings of Western Section, American Society of Animal Sciences, (58):225-228
- Esqueda, M., Sosa, E., Chávez, A., Villanueva, F., Lara, M., Royo, M. & Beltran, S. (2011). Ajuste de carga animal en tierras de pastoreo. *Cuajimalpa. DF INIFAP-SAGARPA. Folleto Técnico*, 4, 1-47.
- FAO. (1991). Guidelines: land evaluation for extensive grazing: Agriculture Organization of the United Nations. *Soil Resources Management and Conservation Service*.
- Fernández, H.H. (2004). Estimación de la disponibilidad de pasto. Cuadernillo clásico de forrajeras INTA, SAGPYA, Argentina. (98):9-12.
- Fick, S.E. & Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12): 4302-4315.
- Flombaum, P. & Sala, O. E. (2007). A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. *Journal of Arid Environments*, 69(2), 352-358.

- Ganguli, A. C., Vermeire, L. T., Mitchell, R. B., & Wallace, M. C. (2000). Comparison of four nondestructive techniques for estimating standing crop in shortgrass plains. *Agronomy Journal*, 92(6), 1211-1215.
- Getabalew, M., & Alemneh, T. (2019). Factors affecting the productivity of rangelands. *MedPub Journals*, 3(1), 19.
- Gezahagn, K., Feyissa, F., Assefa, G., Alemayehu, M., Mengistu, A., Kehaliew, A., *et al.* (2016). Chemical composition and in-vitro organic matter digestibility of Napier grass (*Pennisetum purpureum* (L.) Schumach) accessions in the mid and highland areas of Ethiopia. *International Journal of Livestock Research*, 6(4), 41-59.
- Gómez, E. G., Solís, H. D., Fitzmaurice, A. S., Encinia, F. B., Tristán, V. V., & Grant, W. E. (2007). Patrón de crecimiento de pasto buffel [*Pennisetum ciliare* L.(Link.) Sin. *Cenchrus ciliaris* L.] en Tamaulipas, México. *Técnica Pecuaria en México*, 45(1), 1-17.
- González, Y. & Mendoza, F. (1996). Determinación del momento óptimo de cosecha de las semillas de *Cenchrus ciliaris* híbrido CIH-2. *Pastos Forrajes*, 19(1): 59-64.
- Grüner, E., Astor, T. & Wachendorf, M. (2019). Biomass prediction of heterogeneous temperate grasslands using an SfM approach based on UAV imaging. *Agronomy*, 9(2), 54.
- Gutiérrez, O.G., Morales, C.R., Villalobos, J.C., Ruíz, O., Ortega, J.Á. & Palacio, J. (2019). Composición botánica y valor nutritivo de la dieta consumida por bovinos en un área invadida por pasto rosado [*Melinis repens* (willd.) Zizka]. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(1), 212-226.
- Guzmán-Lucio, M.A., Foroughbakhch-Pournavab, R., Alvarado-Vázquez, M.A., Rocha-Estrada, A., Salcedo-Martínez, S.M. & Moreno-Limón, S. (2016). Gramíneas de los mezquiales en el centro-norte de Nuevo León. *Polibotánica*, (42), 19-42.

- Hamid, A., Singh, S., Agrawal, M., & Agrawal, S. B. (2020). Effects of plant age on performance of the tropical perennial fodder grass, *Cenchrus ciliaris* L. subjected to elevated ultraviolet-B radiation. *Plant Biology*, 22(5), 805-812.
- Harmoney, K. R., Moore, K. J., George, J. R., Brummer, E. C. & Russell, J. R. (1997). Determination of pasture biomass using four indirect methods. *Agronomy Journal*, 89(4), 665-672.
- Holechek, J.L. (1988). An approach for setting the stocking rate. *Rangelands Archives*, 10(1), 10-14.
- Holechek, J. L., Geli, H. M., Cibils, A. F., & Sawalhah, M. N. (2020). Climate change, rangelands, and sustainability of ranching in the Western United States. *Sustainability*, 12(12), 4942.
- Hoover D.L., Lauenroth W.K., Milchunas D.G., Porensky L.M., Augustine D.J. & Derner J.D. (2021) Sensitivity of productivity to precipitation amount and pattern varies by topographic position in a semiarid grassland. *Ecosphere*, 12(2), e03376.
- ILRI (International Livestock Research Institute), IUCN (International Union for Conservation of Nature), FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), WWF (World Wide Fund for Nature), UNEP (United Nations Environment Programme) & ILC (International Land Coalition). (2021). Rangelands Atlas. Nairobi Kenya: ILRI. <https://hdl.handle.net/10568/114064>. Accesado 01 abril, 2023.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2019). Carta de uso del suelo y vegetación: escala 1: 250 000, Serie VI. Monterrey G14-7.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). (2007). Conjunto de datos vectorial Edafológico, escala 1: 250,000, Serie II Continuo Nacional Monterrey.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2012). Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, con resolución de 5m. Terreno. ASCII. G14C16.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2016). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Serie VI (Capa Unión), escala: 1: 250,000.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Marín, Nuevo León. Clave geoestadística 19034.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (2011). Ajuste de carga animal en tierras de pastoreo, Manual de capacitación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Cuajimalpa. México.
- Jackson, J. (2005). Is there a relationship between herbaceous species richness and buffel grass (*Cenchrus ciliaris*)?. *Austral Ecology*, 30(5), 505-517.
- Johnson, P. S., Johnson, C. L., & West, N. E. (1988). Estimation of phytomass for ungrazed crested wheatgrass plants using allometric equations. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 41(5), 421-425.
- Jones, M.O., Robinson, N.P., Naugle, D.E., Maestas, J.D, Reeves, M.C., et al. (2021). Annual and 16-day rangeland production estimates for the western United States. *Rangeland Ecology & Management*, (77): 112-117.
- Kumar, L., Sinha, P., Taylor, S. & Alqurash,i A.F. (2015). Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1): 097696
- Lee, A.E., Muir, J.P., Lambert, B.D., Reilley, J.L. & Whitney, T.R. (2011). Herbage nitrogen, fiber, and *in vitro* disappearance of three Great Plains grasses during establishment. *Crop science*, 51(3): 1334-1341.
- Maderey, L.E. (1990). 'Evapotranspiración real' en Hidrogeografía IV.6.6. Atlas Nacional de México. Vol. II Escala 1 4000000. Instituto de Geografía UNAM. México.

- Mahood, A. L., Fleishman, E., Balch, J. K., Fogarty, F., Horning, N., Leu, M. Bradley, B. A. (2021). Cover-based allometric estimate of aboveground biomass of a non-native, invasive annual grass (*Bromus tectorum* L.) in the Great Basin, USA. *Journal of Arid Environments*, 193, 104582.
- Marroquín-Castillo, J.J., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Peréz, J., Aguirre-Calderón, O., Mata-Balderas, J.M. & Chavez-Costa, A.C. (2016). Composición florística y diversidad de un área restaurada post-minería en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica*, 42(1):1-17.
- Martin M.H., Cox J.R. & Ibarra, F. (1995). Climatic effects on buffelgrass productivity in the Sonoran Desert. *Rangeland Ecology & Management / Journal of Range Management Archives*, 48(1): 60-63.
- Martinez, D.R., Albín, J.L., Cabaleiro, J.C., Pena, T.F., Rivera, F.F. & Blanco, V. (2009). El Criterio de Información n de Akaike en la Obtención n de Modelos Estadísticos de Rendimiento." Conference: XX Jornadas de Paralelismo. Coruña, España. 439-444.
- Martínez-López, J.R., Gutiérrez-Ornelas, E., Barrera-Silva, M.A. & Retes-López, R. (2014). Stochastic simulation for buffelgrass (*Cenchrus ciliaris* L.) pastures in Marin, N.L. Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 17: 87-104.
- Matta, F.D., Fávero, A.P., Vigna, B.Z., Pozzobon, M.T., De Medeiros, S.R., Júnior, W.B. & Cavallari, M.M. (2022). Agronomic, nutritive value, reproductive, cytogenetic, and molecular aspects of Paspalum accessions: Contribution to the development of new forage cultivars. *Grass and Forage Science*, 78(1): 101-118.
- McDonald, C. J. & McPherson, G. R. (2013). Creating hotter fires in the Sonoran Desert: Buffelgrass produces copious fuels and high fire temperatures. *Fire Ecology*, 9: 26-39.
- Mganga, K. Z., Musimba, N. K. R., Nyariki, D. M., Nyangito, M. M., & Mwang'ombe, A. W. (2015). The choice of grass species to combat desertification in semi-arid Kenyan rangelands is greatly influenced by their forage value for livestock. *Grass and Forage Science*, 70(1): 161-167.

- Mills, A., Smith, M. & Moot, D. (2016). Relationships between dry matter yield and height of rotationally grazed dryland lucerne. *New Zealand Grassland Association*, 78: 185-196.
- Mohamed, M.A. & Mohamed, M.H. (2021). Effect of different periods of irrigation on growth and yield of *Cenchrus ciliaris* at semi-arid zone of North Darfur State, Sudan. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 9(2): 001-004.
- Muir, J., Schmidt, M., Tindall, D., Trevithick, R., Scarth, P. & Stewart, J.B. (2011). Field measurement of fractional ground cover: a technical handbook supporting ground cover monitoring for Australia. *ABARES: Canberra, ACT*, 53(4): 1799-1808.
- Mundava, C., Helmholtz, P., Schut, T., Corner, R., McAtee, B. & Lamb, D. (2014). Evaluation of vegetation indices for rangeland biomass estimation in the Kimberley area of Western Australia. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II(7): 47-53.
- Murphy, D. J., Shine, P., Brien, B. O., Donovan, M. O. & Murphy, M. D. (2021b). Utilising grassland management and climate data for more accurate prediction of herbage mass using the rising plate meter. *Precision Agriculture*, 22: 1189-1216.
- Murphy, D.J., Murphy, M.D., O'Brien, B. & O'Donovan, M. (2021a). A review of precision technologies for optimising pasture measurement on Irish grassland. *Agriculture*, 11(7): 600.
- Nafus, A.M., McClaran, M.P., Archer, S.R. & Throop, H.L. (2009). Multispecies allometric models predict grass biomass in semidesert rangeland. *Rangeland Ecology & Management*, 62(1): 68-72.
- Oliveras, I., Van Der Eynden, M., Malhi, Y., Cahuana, N., Menor, C., Zamora, F., & Haugaasen, T. (2014). Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral ecology*, 39(4): 408-415.
- Oñatibia, G.R., Amengual, G., Boyero, L. & Aguiar, M.R. (2020). Aridity exacerbates grazing-induced rangeland degradation: A population approach for dominant grasses. *Journal of Applied Ecology*, 57(10): 1999-2009.

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2022). El papel de la FAO en la ganadería y el medio ambiente. Obtenido de <https://www.fao.org/livestock-environment/es>
- Parsons, A.J., Newman, J.A., Penning, P.D., Harvey, A. & Orr, R.J. (1994). Diet preference of sheep: effects of recent diet, physiological state and species abundance. *Journal of Animal Ecology*, 465-478.
- Paruelo, J. M., Lauenroth, W. K. & Roset, P. A. (2000). Estimating aboveground plant biomass using a photographic technique. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, 53(2): 190-193.
- Pedroza-Parga, E.H., Pedroza-Sandoval, A., Velásquez-Valle, M.A., Sánchez-Cohen, I., Trejo-Calzada, R. & Samaniego-Gaxiola, J.A. (2022). Efecto de la cobertura del suelo sobre el crecimiento y productividad del zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en suelos degradados de zonas áridas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(4): 866-878.
- Pietruszka, M.A. (2020). Chemical potential-induced wall state transitions in plant cell growth. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39: 841-866.
- Pottier, J. & Jabot, F. (2017). Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: a transferable method between contrasted environments. *Ecological Indicators*, 72: 769-776.
- Ramírez, R.G., Enríquez, A. & Lozano, F. (2001). Valor nutricional y degradabilidad ruminal del zacate buffel y nueve zacates nativos del NE de México. *Ciencia UANL*, 4(3).
- Ramírez, R.G., González-Rodríguez, H., Morales-Rodríguez, R., Cerrillo-Soto, A., Juárez-Reyes, A., García-Dessommes, G.J., *et al.* (2009). Chemical composition and dry matter digestion of some native and cultivated grasses in Mexico. *Czech Journal of Animal Science*, 54(4): 150-162.
- Ramírez, R.G., Haenlein, G.F., García-Castillo, C.G. & Núñez-González, M.A. (2004). Protein, lignin and mineral contents and in situ dry matter digestibility of native

- Mexican grasses consumed by range goats. *Small Ruminant Research*, 52(3): 261-269.
- Ramírez, R.G., Mireles, E., Huerta, J.M. & Aranda, J. (1995). Forage selection by range sheep on a buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*) pasture. *Small Ruminant Research*, 17(2): 129-135.
- Ramoelo, A. & Cho, M.A. (2018). Explaining leaf nitrogen distribution in a semi-arid environment predicted on Sentinel-2 imagery using a field spectroscopy derived model. *Remote Sensing*, 10(2): 269.
- Reyes, E.O., Murillo-Ortiz, M., Herrera-Torres, E., Gurrola-Reyes, J. & Carrete-Carreón, F.O. (2014). Cambios estacionales en consumo, composición química y degradabilidad ruminal de la dieta seleccionada por novillos en pastoreo. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 1(2): 97-106.
- Sawalhah, M. N., Holechek, J. L., Cibils, A. F., Geli, H. M. & Zaied, A. (2019). Rangeland livestock production in relation to climate and vegetation trends in New Mexico. *Rangeland Ecology & Management*, 72(5): 832-845.
- Siller-Clavel, P., Badano, E.I., Villarreal-Guerrero, F., Prieto-Amparán, J. A., Pinedo-Alvarez, A., Corrales-Lerma, R. & Hernández-Quiroz, N.S. (2022). Distribution patterns of invasive buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*) in Mexico estimated with climate niche models under the current and future climate. *Plants*, 11(9): 1160.
- Sorensen, G.E., Wester, D.B. & Rideout-Hanzak, S. (2012). A nondestructive method to estimate standing crop of purple threeawn and blue grama. *Rangeland Ecology & Management*, 65(5): 538-542.
- Sosa-Montes, E., Mendoza-Pedroza, S.I., Huerta-Prado, L.A., González-Cerón, F., Silva-Luna, M. & Bárcena-Gama, J.R. (2021). Composición nutricional de seis gramíneas tropicales del Estado de Jalisco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(II).

- Soto-Bravo, F. & González-Lutz, M.I. (2019). Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2): 517-534.
- Tackenberg, O. (2007). A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis. *Annals of botany*, 99(4): 777-783.
- Valdés, J. (2015). *Gramíneas de Coahuila* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México. CONABIO. 178 – 398, 556 pp.
- Valdez, C., Guzmán, M.A., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M.A. & Rocha, A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4): 1674-1682.
- Van Soest, P.V., Robertson, J.B. & Lewis, B.A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10): 3583-3597.
- Vásquez, A.R., García, D.A., Ibarra, J.C. & Villarreal, Q.J. (2001). *Las Plantas Del Valle De Cuatrociénegas, Coahuila, México; Lista Actualizada, Complementada Y Reordenada Alfabéticamente*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Folleto de divulgación, Vol. 3. p.p. 71
- Viljanen, N., Honkavaara, E., Näsi, R., Hakala, T., Niemeläinen, O. & Kaivosoja, J. (2018). A Novel Machine Learning Method for Estimating Biomass of Grass Swards Using a Photogrammetric Canopy Height Model, Images and Vegetation Indices Captured by a Drone. *Agriculture*, (8): 70.
- Virgilio, A., Lambertucci, S. A. & Morales, J. M. (2019). Sustainable grazing management in rangelands: Over a century searching for a silver bullet. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 283: 106561.
- Williams, D.G. & Baruc, Z. (2000). African grass invasion in the Americas: ecosystem consequences and the role of ecophysiology. *Biological invasions*, (2): 123-140.

Xu, K., Su, Y., Liu, J., Hu, T., Jin, S., et al. (2020). Estimation of degraded grassland aboveground biomass using machine learning methods from terrestrial laser scanning data. *Ecological Indicators*, (108): 105747.

Zárate, J.L. (2012). Livestock and natural resources in a nature reserve in south Sonora, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 15: 187-197.