



## Generación de nuevas ecuaciones para estimar la biomasa aérea a partir de variables morfológicas obtenidas de pastos en agostaderos de Nuevo León, México



Juan Emmanuel Segura Carmona<sup>a</sup>

José Israel Yerena Yamallel<sup>a\*</sup>

Hugo Bernal Barragán<sup>b</sup>

Eduardo Alanís Rodríguez<sup>a</sup>

Luis Gerardo Cuéllar Rodríguez<sup>a</sup>

Javier Jiménez Pérez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales. Kilómetro 145, Carretera nacional 85, Linares, N.L. México.

<sup>b</sup> Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. México.

\* Autor de correspondencia: israel.yerena@gmail.com

### Resumen:

La estimación de biomasa aérea de pastos contribuye a realizar un manejo eficiente y sostenible de los agostaderos. El objetivo del presente estudio fue generar nuevas ecuaciones para estimar la biomasa aérea de pastos presentes en agostaderos, en Nuevo León, México, basado en datos colectados del total (n=745) de los individuos de las cinco especies de pastos: *Cenchrus ciliaris* Linnaeus, *Pappophorum bicolor* Fourn, *Aristida purpurea* Nutt, *Tridens texanus* Watson y *Paspalum pubiflorum* Fourn presentes en las parcelas de muestreo. Utilizando la altura máxima y la de los tallos vegetativos, los diámetros aéreo, basal y comprimido, y volúmenes medidos en cada uno de los individuos colectados, se generaron ecuaciones lineales (stepwise) y no lineales, para estimar la biomasa aérea (base materia seca)

de los pastos cortados a ras de suelo. Se seleccionaron seis ecuaciones generales con el mejor ajuste estadístico para el total de las especies colectadas. La ecuación general III tuvo los mejores valores de  $R^2=0.88$  y  $AIC=3079$ , utilizando las cinco variables evaluadas. La ecuación general IV estimó con  $R^2=0.86$  y  $AIC=3530$ , utilizando solo la variable de diámetro comprimido. Las ecuaciones específicas seleccionadas estimaron la biomasa aérea de los pastos *Cenchrus ciliaris* ( $R^2=0.88$ ,  $r=0.94$ ), *Pappophorum bicolor* ( $R^2=0.86$ ,  $r=0.92$ ), *Aristida purpurea* ( $R^2=0.92$ ,  $r=0.96$ ), *Tridens texanus* ( $R^2=0.91$ ,  $r=0.96$ ), y *Paspalum pubiflorum* ( $R^2=0.93$ ,  $r=0.97$ ). Las nuevas ecuaciones 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.

**Palabras clave:** Ecuaciones alométricas, *Cenchrus ciliaris*, Pastos nativos, Diámetro comprimido.

Recibido: 04/05/2023

Aceptado: 25/09/2023

## 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<sup>(1,2)</sup>, 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<sup>(3,4)</sup>, por fallas en un aprovechamiento eficiente y sostenible del agostadero para cubrir los requerimientos de biomasa forrajera del hato ganadero<sup>(5)</sup>. Por lo anterior es importante contar con estimaciones confiables de la cantidad de forraje disponible para el ganado, que permitan hacer un uso adecuado del forraje, evitar el sobrepastoreo y satisfacer las necesidades de los animales<sup>(6,7)</sup>. El método tradicional para estimar la producción de biomasa aérea es el de corte y pesado del pasto, aunque este método destructivo es preciso, suele ser costoso y tardado<sup>(8,9)</sup>. Además, la distribución aleatoria de la vegetación obliga a incrementar el número de muestras recomendada por sitio (15-20 muestras<sup>(10)</sup>), colectadas idealmente en cada estación de crecimiento del forraje<sup>(8)</sup>.

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 presente), 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<sup>(11,12)</sup>. Los

métodos empíricos subjetivos de estimación visual tienen la desventaja de una alta variación en los resultados entre las personas que lo realizan en diferentes periodos de tiempo<sup>(13)</sup>. Platos o bastones graduados han sido utilizados en décadas recientes, para estimar la biomasa forrajera en praderas con vegetación homogénea<sup>(14,15)</sup>. Nuevas metodologías para la estimación de la biomasa han sido desarrolladas mediante la utilización de imágenes satelitales<sup>(16)</sup>, imágenes de radar<sup>(17)</sup> y a través de vehículos no tripulados<sup>(18)</sup>, 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) 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<sup>(19,20)</sup>. 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 solamente midiendo las variables vegetativas necesarias, sin necesidad de cortar las plantas<sup>(5,9)</sup>.

Estudios previos al presente trabajo han sido realizados en praderas bajo condiciones de riego y monocultivos<sup>(15,21,22)</sup>. Para condiciones de agostaderos, se han publicado resultados obtenidos en condiciones áridas de Arizona<sup>(23)</sup> y de multiespecies en Argentina<sup>(9)</sup>. 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<sup>(24)</sup>, así como las ecuaciones generadas para *A. purpurea* en un estudio previo<sup>(25)</sup>, utilizando el diámetro de la planta a diferentes alturas como variables.

En Europa se desarrolló una metodología de estimación indirecta para especies de pastos<sup>(21)</sup>, 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.

## Material 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 varía de 20 a 22 °C<sup>(26)</sup>. El tipo de vegetación principal es de matorral espinoso tamaulipeco (MET), además de contar con áreas de pastizal inducido y agrícolas.

En Enero de 2021 se establecieron de forma aleatoria dentro del 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 m<sup>2</sup>, en las cuales se realizó la colecta y se registró el peso (base materia seca) 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<sup>(27)</sup>. Se colocó un cerco perimetral alrededor de cada parcela, para evitar disturbios. Todas las parcelas se cortaron una altura de 3 a 5 cm, al inicio del estudio y en cada muestreo. El primer muestreo se llevó a cabo del 15 de junio al 15 de julio del 2021, y 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 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), ya que de acuerdo a estudios previos<sup>(28)</sup>, 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 *Cenchrus ciliaris*<sup>(29)</sup> durante el verano y el otoño.

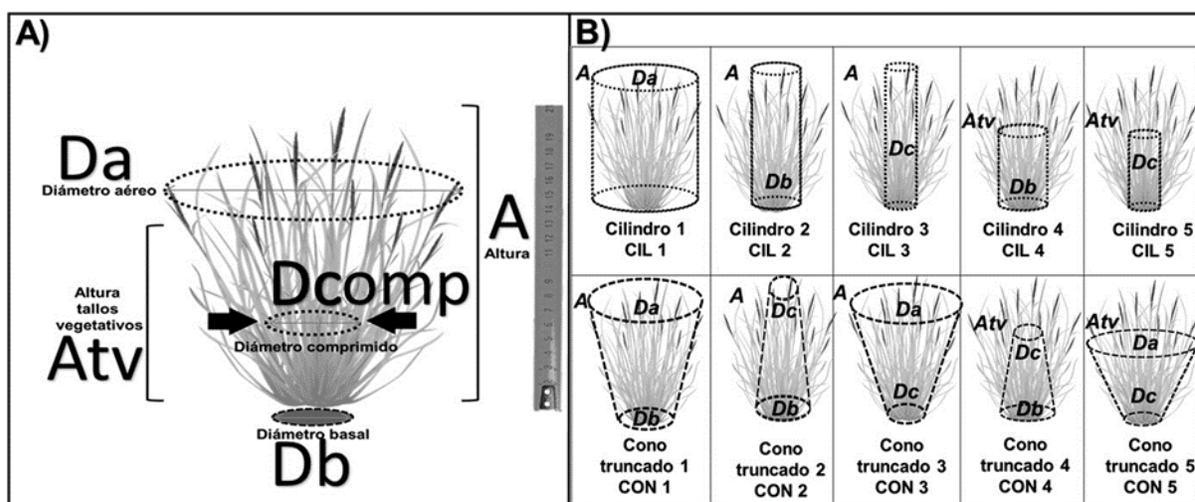
En cada subparcela se muestrearon e identificaron individualmente a nivel de género y especie, todas las plantas de las especies de gramíneas presentes. Se utilizó un flexómetro marca Truper® modelo pro-Lock FX-5M, para medir las variables descritas a continuación y mostradas en la Figura 1A:

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 que, por medio de una banda retráctil, aplica una presión uniforme graduada de 2 kg en los tallos vegetativos.
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 CIL5), y cono (en modalidades CON 1 a CON5), señalados en la Figura 1B, se basaron en propuestas previas<sup>(30)</sup>.

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).

**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; Dc= diámetro comprimido; Da= diámetro aéreo.

Se identificaron, midieron y cortaron los 745 individuos encontrados en las subparcelas de muestreo. Se colectaron las plantas 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 19 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 cono 1, volumen cono 2, volumen cono 3, volumen cono 4, volumen cono 5) y una variable dependiente (biomasa medida [g MS] por individuo de las especies de pastos) fueron

sometidas a análisis de regresión lineal, de pasos sucesivos<sup>(9)</sup> y regresión no lineal (logarítmico, inverso, cuadrático, cubico, potencia, exponencial) en el software IBM SPSS, para generar ecuaciones de predicción de biomasa tanto de forma general y de forma específica (por cada una de las cinco especies de pastos encontrados en los muestreos).

Para evaluar la calidad de la estimación de 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 ( $R^2$ )<sup>(27)</sup>, el error estándar (EE)<sup>(30)</sup>, la correlación de Pearson ( $r$ )<sup>(18)</sup>, la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE)<sup>(21)</sup> y el criterio de información de Akaike (AIC)<sup>(27)</sup>.

Se seleccionaron las seis ecuaciones generales desarrolladas con los mejores ajustes estadísticos de AIC, NRMSE,  $R^2$ , EE,  $r$ , para la estimación del total de las especies colectadas, y una ecuación específica para cada una de las cinco especies de pasto registradas.

## 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 (Cuadro 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.

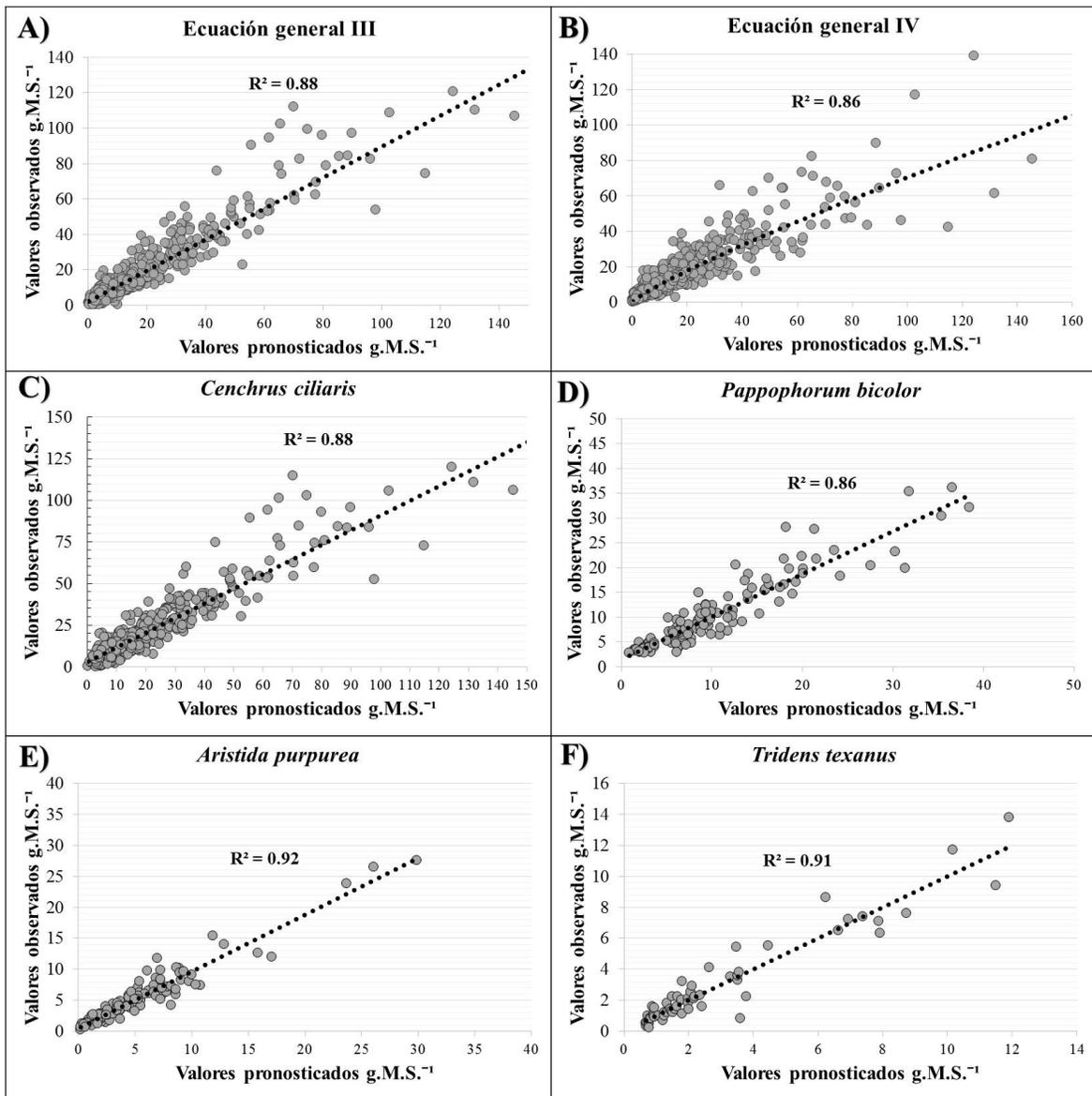
Las estimaciones de biomasa aérea calculadas con las seis nuevas ecuaciones generales generadas en el presente estudio, tuvieron coeficientes de determinación ( $R^2$ ) que variaron entre 0.77 y 0.90, mientras que el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) de 0.88 a 0.94. La raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) varió de 0.68 a 0.48 y el criterio de información de Akaike (AIC) tomo valores de 3553 a 3079 (Cuadro 2).

**Cuadro 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 en las subparcelas experimentales de 1m<sup>2</sup>

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

<sup>abcd</sup> 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 5 (Figura 1B), el cual es calculado a partir de tres variables directas (diámetro aéreo, diámetro comprimido y altura de los tallos vegetativos), y cuyas estimaciones tienen un R<sup>2</sup> de 0.77, r= 0.88, NRMSE= 0.64, AIC= 3469. Las estimaciones calculadas con la ecuación II (lineal) a partir de los datos generados por las variables diámetro aéreo, diámetro comprimido, altura y altura de los tallos vegetativos, tienen un R<sup>2</sup> de 0.87, r= 0.93, NRMSE= 0.49, AIC= 3108. La ecuación III (lineal) incorpora los datos de las cinco variables medidas para calcular estimaciones que tienen un R<sup>2</sup> de 0.88, r= 0.94, NRMSE= 0.48, AIC= 3079 (Figura 2A).

**Figura 2:** Regresión de los valores pronosticados y los valores observados

A) Ecuación general III (Cuadro 2). B) Ecuación general IV (diámetro comprimido). C) Ecuación específica para *Cenchrus ciliaris*. D) Ecuación específica para *Pappophorum bicolor* (Cuadro 2). E) Ecuación específica de *Aristida purpurea*. F) Ecuación específica de *Tridens texanus* (Cuadro 2). Todas las gráficas fueron ajustadas a cero.

Las ecuaciones no lineales IV ( $R^2=0.86$ ,  $r=0.88$ ,  $\text{NRMSE}=0.67$ ,  $\text{AIC}=3530$ ; Figura 2B), V ( $R^2=0.89$ ,  $r=0.88$ ,  $\text{NRMSE}=0.68$ ,  $\text{AIC}=3553$ ) y VI ( $R^2=0.90$ ,  $r=0.88$ ,  $\text{NRMSE}=0.67$ ,  $\text{AIC}=3530$ ), son del modelo de potencia, y utilizan menor cantidad de variables. Las estimaciones calculadas utilizando la ecuación IV, que utiliza el diámetro comprimido como única variable tienen un  $R^2=0.86$ , (Figura 2B). La ecuación V utiliza el cilindro 3, calculado a partir del diámetro comprimido y de la altura de la planta, para estimar biomasa aérea de pastos con

$R^2=0.89$ . La ecuación VI utiliza el cilindro 5 (Figura 1B), calculado a partir del diámetro comprimido y la altura de los tallos vegetativos para estimar biomasa aérea con  $R^2=0.90$  (Cuadro 2).

En el caso de las ecuaciones generadas específicamente para cada una de las especies de pastos, las comparaciones entre los valores estimados y los resultados registrados directamente de biomasa aérea arrojaron valores de  $R^2$  de 0.86 hasta 0.93. Los valores de  $r$ (Pearson) variaron de 0.92 a 0.97. Para NRMSE se registraron valores de 0.40 a 0.24 y AIC tomó valores de 1603 a -18 (Cuadro 2). En el caso específico de la ecuación 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 2C).

Los resultados estimados utilizando las cinco variables con la ecuación específica para la especie *Pappophorum bicolor* (Cuadro 2) tuvieron un ajuste de ( $R^2 = 0.86$ ,  $r = 0.92$ , NRMSE = 0.29, AIC = 287) (Figura 2D).

La información recopilada de 107 individuos de *Aristida purpurea*, permitió generar una ecuación específica para esta especie de pasto (Cuadro 2), 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, AIC = 87. (Figura 2E).

**Cuadro 2:** Ecuaciones alométricas generales y específicas generadas a partir de variables morfológicas para estimar indirectamente la biomasa aérea de los pastos (g MS<sup>-1</sup>)

Id	Ecuación	R <sup>2</sup>	EE	r	NRM	
					SE	AIC
<i>Ecuaciones generales</i>						
I	$Y = 0.9648 + 0.0026CON5$	0.77	10.1	0.88	0.64	3469
II	$Y = 2.5343 + 0.0027CON5 + 0.0139CIL3 - 0.0295COBAC + 0.8253Dcomp - 0.2595Atv + 0.0002CIL1$	0.87	7.8	0.93	0.49	3108
III	$Y = 1.2159 + 0.0032CON5 + 0.0447CIL3 - 0.0421COBAC + 0.8939Dcomp - 0.3478Atv + 0.0003CIL1 - 0.0253CON2 + 0.5790Db + 0.0084CIL2$	0.88	7.5	0.94	0.48	3079
IV	$Y = 0.1213 * Dcomp^{1.6818}$	0.86	0.4	0.88	0.67	3530
V	$Y = 0.4473 * CIL3^{0.7288}$	0.89	0.4	0.88	0.68	3553
VI	$Y = 0.8084 * CIL5^{0.7078}$	0.90	0.4	0.88	0.67	3530
<i>Ecuaciones específicas</i>						

C.c.	$Y = 0.2862 + 0.0032CON5 - 0.0753COBAC + 1.4623Dcomp - 0.0767CON4 + 0.0279CIL4 + 0.0902COBBC - 0.3257Atv + 0.0022CIL1 - 0.0032CON1 + 0.0931CIL5$	0.88	9.0	0.94	0.40	1603
P.b.	$Y = 2.1060 + 0.0490CIL3 + 0.0050CON4 + 0.0002CON3 - 0.0050COBBE$	0.86	3.0	0.92	0.29	287
A.p.	$Y = -0.6641 + 0.1138CIL5 + 0.1257Da + 0.0046CON2 - 0.0816COBBC + 0.1951Dcomp$	0.92	1.5	0.96	0.27	87
T.t.	$Y = 0.5474 + (0.1672 * CIL3) + (-0.0012 * CIL3) + (1.18 \times 10^{-5} * CIL3)$	0.91	0.9	0.96	0.30	-18
P.p.	$Y = -0.0371 + (0.2744 * CIL3) + (-0.0020 * CIL3) + (6 \times 10^{-6} * CIL3)$	0.93	2.3	0.97	0.24	57

Ecuaciones de modelo lineal= I, II, III, C.c., P.b., y A.p.; Ecuaciones de modelo potencial= IV, V y VI; Ecuaciones de modelo cúbico= T.t. y P.p.; Y= Biomasa aérea (g MS<sup>-1</sup>); R<sup>2</sup>= 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; C.c.=*Cenchrus ciliaris*; P.b.= *Pappophorum bicolor*; A.p.= *Aristida purpurea*; T.t.= *Tridens texanus*; P.p.= *Paspalum pubiflorum*. Ver Figura 1 para Db, Da, Dcomp, A, Atv, COBBE, COBBC, COBAC, CIL1, CIL2, CIL3, CIL5, CON1, CON2, CON3, CON4, CON5. Todos los coeficientes de regresión fueron significativos (P<0.05).

La variable cilindro 3, calculada a partir de la altura de la planta y el diámetro comprimido, fue la base para generar las ecuaciones específicas para *Tridens texanus* y *Paspalum pubiflorum* en modelo cúbico, cuyas estimaciones tuvieron un ajuste de R<sup>2</sup> de 0.91, r= 0.96, NRMSE= 0.30, AIC= -18 para *Tridens texanus* (Figura 2F) y de R<sup>2</sup>= 0.93, r= 0.97, NRMSE= 0.24, AIC= 57 para *P. pubiflorum*.

## Discusión

Las ecuaciones lineares y polinómicas generadas en el presente estudio a partir del muestreo de medidas vegetativas y de registros de peso de biomasa de gramíneas presentes en agostadero, permitieron estimar la biomasa aérea de gramíneas presentes en el agostadero, con alto grado de precisión.

Las nuevas ecuaciones alométricas generales establecidas en el presente estudio, tuvieron valores de R<sup>2</sup> (0.77 a 0.93) superiores a los reportados previamente (R<sup>2</sup> de 0.25 a 0.85) para estimaciones de ecuaciones generales para dos gramíneas y dos pseudogramíneas en los Andes Peruanos<sup>(27)</sup>. Ecuaciones alométricas generadas en Chubut, Argentina<sup>(23)</sup>, evaluando 50 individuos de tres especies de gramíneas, tuvieron valores de R<sup>2</sup> (de entre 0.72 y 0.86), similares a las obtenidas en el presente estudio.

El número de parcelas establecidas en el presente estudio fue similar al utilizado previamente<sup>(27)</sup>, sin embargo, en el presente estudio se tuvieron parcelas de 100 m<sup>2</sup>, mientras que en el estudio previo<sup>(27)</sup>, tuvieron parcelas de 4 m<sup>2</sup>. Además, en cada una de las 31 parcelas

del presente estudio, se registraron 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* tuvo 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, calculada tomando en cuenta el número de individuos y el peso promedio de los individuos de la especie mostrados en el Cuadro 1, representó el 80 % de la biomasa registrada en el agostadero evaluado. En las áreas evaluadas en el presente estudio, el pasto *C. ciliaris* presente se estableció por dispersión natural, dejando en evidencia su alto potencial para establecerse en los agostaderos en México<sup>(31)</sup>. La especie nativa con mayor presencia en el presente estudio fue *Pappophorum bicolor*, que tuvo registro de 125 individuos, es decir el 17 % del total, cuya biomasa representó solo 11 % de la biomasa total (Cuadro 1).

El diámetro comprimido fue la variable incluida en el 100 % en las ecuaciones alométricas generales y en el 97 % de las ecuaciones específicas, tanto para el modelo lineal como no lineal, generadas en el presente estudio para cada especie de pasto. La altura de los tallos vegetativos fue incluida en el 87 % de las ecuaciones generales. La variable altura de los tallos vegetativos y la altura de la planta fueron incluidas en el 71 % de las ecuaciones específicas. Estas variables han sido directamente relacionadas con la densidad del forraje<sup>(32)</sup>. Algunos autores<sup>(30)</sup> reportaron que en praderas con condiciones óptimas para su desarrollo, la variable cobertura vegetal es la que mejor puede estimar indirectamente la biomasa. Mahood *et al*<sup>(22)</sup>, 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<sup>(21)</sup>, 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 de los resultados obtenidos.

Los valores de NRMSE calculados en cada una de las nuevas ecuaciones generadas en el presente estudio determinan la dispersión de los datos estimados respecto a los datos observados, siendo 0 el ajuste ideal<sup>(33)</sup>. 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<sup>(34,35)</sup>. Los valores de NRMSE y AIC son de gran utilidad en la selección de los mejores modelos.

La ecuación específica generada en el presente estudio para *Cenchrus ciliaris* tuvo valor de  $R^2 = 0.87$ , y con ello,  $R^2$  similar al reportado en un estudio ( $R^2$  de 0.82<sup>(24)</sup>) para generar 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 generada en el presente estudio para *A. purpurea* resultó con un  $R^2 = 0.89$ , similar a los reportados ( $R^2$  de 0.82 a 0.90) en un estudio previo<sup>(25)</sup>, para la especie *A. purpurea*, utilizando el diámetro de la planta a diferentes alturas. Algunos autores<sup>(30)</sup> generaron ecuaciones para estimar biomasa aérea a partir del análisis de 93 plantas de *Agropyron desertorum* y reportaron coeficientes de variación ( $R^2$  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<sup>(36)</sup>.

El desarrollo de ecuaciones alométricas con aplicación en agostadero es de suma importancia para lograr un manejo sustentable del ecosistema<sup>(27)</sup>. Estos muestreos de vegetación no destructivos tienen ventajas con relación al tiempo y presupuesto respecto al muestreo tradicional, y permiten además el monitoreo del crecimiento a nivel de individuo<sup>(21,37)</sup>.

## Conclusiones e implicaciones

Se evaluó la importancia de 19 variables relacionadas con las características morfológicas de pastos presentes en el agostadero para estimar la producción de biomasa aérea por planta. Con esas informaciones se generaron 6 nuevas ecuaciones generales para cinco especies de pasto presentes en el área de estudio, y 5 nuevas ecuaciones específicas (una para cada especie de pasto *Cenchrus ciliaris*, *Pappophorum bicolor*, *Aristida purpurea*, *Tridens texanus* y *Paspalum pubiflorum*), que estiman de manera confiable y práctica la producción de biomasa sin destruir (cortar) la planta. Las nuevas ecuaciones que se generaron en este estudio son una opción viable para sustituir la fase de corte de las muestras en el método tradicional de estimación de la producción de biomasa aérea de pastos en el agostadero. El desarrollo de ecuaciones alométricas generales (multiespecies) y específicas (para una especie de pasto en particular) 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.

## Agradecimientos

Se agradece al CONAHCYT por la beca otorgada al primer autor, durante el desarrollo de esta investigación.

### Literatura citada:

1. 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). Rangelands Atlas. Nairobi Kenya: ILRI. 2021 <https://hdl.handle.net/10568/114064>. Accessed Apr 1, 2023.
2. Jones MO, Robinson NP, Naugle DE, Maestas JD, Reeves MC, *et al.* Annual and 16-day rangeland production estimates for the western United States. *Rangeland Ecol Management* 2021;(77):112-117.
3. Mganga KZ, Musimba NKR, Nyariki DM, Nyangito MM, Mwang'ombe AW. The choice of grass species to combat desertification in semi-arid Kenyan rangelands is greatly influenced by their forage value for livestock. *Grass Forage Sci* 2015;70(1):161-167.
4. Williams DG, Baruc Z. African grass invasion in the Americas: ecosystem consequences and the role of ecophysiology. *Biolog Invasions* 2000;(2):123-140.
5. Murphy DJ, Shine P, Brien BO, Donovan MO, Murphy MD. Utilising grassland management and climate data for more accurate prediction of herbage mass using the rising plate meter. *Precision Agric* 2021;(22):1189-1216.
6. Mundava C, Helmholz P, Schut T, Corner R, McAtee B, Lamb D. 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*. 2014;(II-7):47-53.
7. Grüner E, Astor T, Wachendorf M. Biomass prediction of heterogeneous temperate grasslands using an SfM approach based on UAV imaging. *Agronomy* 2019;9(2):54.
8. Murphy DJ, Murphy MD, O'Brien B, O'Donovan MA. Review of precision technologies for optimising pasture measurement on irish grassland. *Agriculture* 2021;(11):600. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070600>.
9. Nafus AM, McClaran MP, Archer SR, Throop HL. Multispecies allometric models predict grass biomass in semidesert rangeland. *Rangeland Ecol Management* 2009;62(1):68-72.

10. Fernández HH. Estimación de la disponibilidad de pasto. Cuadernillo clásico de forrajeras INTA, SAGPYA, Argentina. 2004;(98):9-12.
11. Tackenberg O. A new method for non-destructive measurement of biomass, growth rates, vertical biomass distribution and dry matter content based on digital image analysis. *Ann Botany* 2007;99(4):777-783.
12. Butterfield HS, Malmström CM. The effects of phenology on indirect measures of aboveground biomass in annual grasses. *Int J Remote Sensing* 2009;30(12):3133-3146.
13. Andariese SW, Covington WW. Biomass estimation for four common grass species in northern Arizona ponderosa pine. *Rangeland Ecology Management/J Range Management Archives* 1986;39(5):472-473.
14. Harmony KR, Moore KJ, George JR, Brummer EC, Russell JR. Determination of pasture biomass using four indirect methods. *Agronomy J* 1997;89(4):665-672.
15. Damiran D, DelCurto T, Darambazar E, Clark AA, Kennedy PL, Taylor R. Visual obstruction: weight technique for estimating production on northwestern bunchgrass prairie rangelands. In: *Proc Western Sec, Am Soc Anim Sci* 2007;(58):225-228.
16. Chen Y, Guerschman J, Shendryk Y, Henry D, Harrison MT. Estimating pasture biomass using sentinel-2 imagery and machine learning. *Remote Sens* 2021;(13):603.
17. Xu K, Su Y, Liu J, Hu T, Jin S, *et al.* Estimation of degraded grassland aboveground biomass using machine learning methods from terrestrial laser scanning data. *Ecological Indicators* 2020;(108):105747.
18. Viljanen N, Honkavaara E, Näsi R, Hakala T, Niemeläinen O, Kaivosoja J. 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* 2018;(8):70.
- 19- Marroquín-Castillo JJ, Alanís-Rodríguez E, Jiménez-Peréz J, Aguirre-Calderón O, Mata-Balderas JM, Chavez-Costa AC. Composición florística y diversidad de un área restaurada post-minería en el matorral espinoso tamaulipeco. *Polibotánica* 2016;42(1):1-17.
20. Valdez C, Guzmán MA, Valdés A, Foroughbakhch R, Alvarado MA, Rocha A. Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístino de Tamaulipas, México. *Rev Biología Trop* 2018;66(4):1674-1682.
21. Pottier J, Jabot F. Non-destructive biomass estimation of herbaceous plant individuals: a transferable method between contrasted environments. *Ecological Indicators* 2017;(72):769-776.

22. Mahood AL, Fleishman E, Balch JK, Fogarty F, Horning N, Leu M, *et al.* Cover-based allometric estimate of aboveground biomass of a non-native, invasive annual grass (*Bromus tectorum* L.) in the Great Basin, USA. *J Arid Environ* 2021;(193):104582.
23. Flombaum P, Sala OE. A non-destructive and rapid method to estimate biomass and aboveground net primary production in arid environments. *J Arid Environ* 2007;69(2):352-358.
24. McDonald CJ, McPherson GR. Creating hotter fires in the Sonoran Desert: Buffelgrass produces copious fuels and high fire temperatures. *Fire Ecology* 2013;39(4):26-39.
25. Sorensen GE, Wester DB, Rideout-Hanzak S. A nondestructive method to estimate standing crop of purple threeawn and blue grama. *Rangeland Ecol Management* 2012;65(5):538-542.
26. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Marín, Nuevo León. Clave geoestadística 19034. México, 2009.
27. Oliveras I, Eynden M, Malhi Y, Cahuana N, Menor C, Zamora F, *et al.* Grass allometry and estimation of above-ground biomass in tropical alpine tussock grasslands. *Austral Ecol* 2014;39(4):408-415.
28. González Y, Mendoza F. Determinación del momento óptimo de cosecha de las semillas de *Cenchrus ciliaris* híbrido CIH-2. *Pastos Forrajes* 1996;19(1):59-64.
29. Martin MH, Cox JR, Ibarra FF. Climatic effects on buffelgrass productivity in the Sonoran Desert. *Rangeland Ecol Management/J Range Management Archives* 1995;48(1): 60-63.
30. Johnson PS, Johnson CL, West NE. Estimation of phytomass for ungrazed crested wheatgrass plants using allometric equations. *Rangeland Ecol Management/J Range Management Archives* 1988;41(5):421-425.
31. Siller-Clavel P, Badano EI, Villarreal-Guerrero F, Prieto-Amparán JA, Pinedo-Álvarez, *et al.* Distribution patterns of invasive buffelgrass (*Cenchrus ciliaris*) in Mexico estimated with climate niche models under the current and future climate. *Plants* 2022;11(9):1160.
32. Barnetson J, Phinn S, Scarth P. Estimating plant pasture biomass and quality from UAV imaging across Queensland's Rangelands. *Agri Engineering* 2020;2(4):523-543.
33. Soto-Bravo F, González-Lutz MI. Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana* 2019;30(2):517-534.

34. Martinez DR, Albín JL, Cabaleiro JC, Pena TF, Rivera FF, Blanco V. El criterio de información n de Akaike en la obtención n de Modelos Estadísticos de Rendimiento. Conference: XX Jornadas de Paralelismo. Coruña, España. 2009;439-444.
35. Cavanaugh JE, Neath AA. The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 2019;11(3):e1460.
36. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). Ajuste de carga animal en tierras de pastoreo, Manual de capacitación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Cuajimalpa. México. 2011.
37. Mills A, Smith M, Moot D. Relationships between dry matter yield and height of rotationally grazed dryland lucerne. N Z Grasslands 2016;(78):185-196.