



Calidad física y fisiológica de ecotipos de gramíneas nativas del Altiplano Tamaulipeco para la rehabilitación de zonas semiáridas

Jesús E. Ochoa-Lechuga¹ (<https://orcid.org/0009-0007-8744-6513>)

Edith Ramírez-Segura² (<https://orcid.org/0000-0001-8018-6674>)

Fernando Lucio-Ruíz³ (<https://orcid.org/0000-0001-5171-0027>)

Santiago Joaquín-Cancino¹ (<https://orcid.org/0000-0002-5084-8128>)

Benigno Estrada-Drouaillet¹ (<https://orcid.org/0000-0002-0332-5658>)

Andrés G. Limas-Martínez¹ (<https://orcid.org/0000-0002-5105-9622>)

Jonathan R. Garay-Martínez^{4*} (<https://orcid.org/0000-0002-7197-3673>)

¹Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario, Ciudad Victoria, Tamaulipas, C. P. 87149, México.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Agricultura Familiar. Ojuelos de Jalisco, Jalisco. C. P. 47540, México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - Campo Experimental San Luis. Palma de la Cruz, San Luis Potosí, C. P. 78432, México.

⁴Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias - Campo Experimental Las Huastecas. Altamira, Tamaulipas, C. P. 89610, México.



*Autor para correspondencia: garay.jonathan@inifap.gob.mx; tel. 553 871 8700, ext. 83315.

Resumen

La caracterización física y fisiológica de semillas es fundamental para poder seleccionar materiales con potencial en la rehabilitación de pastizales. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad física y fisiológica de cariósides de ecotipos pertenecientes a cinco especies de gramíneas nativas del Altiplano Tamaulipeco, México. Se recolectaron propágulos de 14 ecotipos, y se determinó el peso de 1 000 cariósides, ancho y largo de cariósides, número de cariósides por kilogramo y porcentaje de germinación. Los datos se analizaron bajo un diseño completamente al azar y, cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). El ecotipo TTES presentó el mayor peso de 1 000 cariósides (770 mg). Los ecotipos LECP, LLPT y LVHR, de la especie Lobero, tuvieron más de 8.4 millones de cariósides por kilogramo. En germinación, destacaron tres ecotipos de Banderita (BEST [65 %], BLFR [51 %] y BTOM [58 %]) y uno de Navajita (NVHR [46 %]), los cuales también mostraron mayor peso de cariósides. Estos ecotipos exhiben atributos físicos favorables con elevada capacidad germinativa, por lo que se podrían utilizar en programas de rehabilitación de agostaderos y en la producción de semilla nativa de calidad.

Palabras clave: propágulos, cariósides, ecotipos, germinación.

Recibido: 17/07/2025

Aceptado: 11/09/2025

Introducción



La rehabilitación y el establecimiento de pastos nativos en zonas áridas y semiáridas de México enfrentan múltiples limitaciones, como el déficit hídrico, ya que las siembras se realizan bajo condiciones de temporal. Este estrés afecta de manera crítica la germinación y el establecimiento de las plántulas (Ramírez-Segura et al., 2022). Adicionalmente, la temperatura juega un papel determinante, pues incluso con imbibición adecuada, la germinación no ocurre si no se alcanzan las condiciones térmicas óptimas (Quero-Carrillo et al., 2016). En este sentido, la temperatura adecuada permite desencadenar las reacciones bioquímicas que favorecen el desarrollo de estructuras esenciales como la plúmula y la radícula (Portuguez-García et al., 2020).

La calidad física del propágulo es otro factor que condiciona el establecimiento exitoso. En pastos forrajeros, los propágulos pueden ser espigas, espiguillas, ramillas o cariósides. Comercialmente se utilizan las espigas completas cubiertas con brácteas accesorias (glumas, lema, palea), las cuales actúan como barreras físicas que reducen la germinación (Hernández-Guzmán et al., 2021). Asimismo, la latencia constituye un mecanismo que impide la germinación aun en condiciones favorables, ya sea por inmadurez del embrión o por la presencia de inhibidores fisiológicos (Ramírez-Segura et al., 2022).

La falta de domesticación de muchas especies de pastos nativos limita su manejo agronómico, lo cual dificulta la producción eficiente, lo que a su vez se refleja en la escasez y calidad deficiente de las semillas (López-Velázquez et al., 2023). La demanda de semilla está condicionada por el potencial forrajero de la especie, así como por la calidad física y fisiológica, aspectos que determinan su viabilidad, pureza y vigor (Rivas-Jacobo et al., 2017). Estos atributos están estrechamente relacionados con el manejo que se realiza antes, durante y después de la cosecha (Ramírez-Segura et al., 2022). En este sentido, conocer la calidad fisiológica de la semilla, la ecología de la planta y su respuesta al manejo agronómico es fundamental para mejorar la producción de forraje y semilla. En pastos nativos, esta información es doblemente relevante, ya que contribuye a conservar la diversidad genética y facilita el diseño de estrategias de conservación para su establecimiento en campo. Es necesario desarrollar prácticas adecuadas de almacenamiento, beneficio y manejo agronómico, tanto en pastizales naturales como en plantaciones, para contribuir a la recuperación de los ecosistemas y la sustentabilidad de los sistemas ganaderos extensivos (Huss & Gierlinger, 2021).



Estudios recientes sugieren que las respuestas de germinación al estrés térmico e hídrico están asociadas con el peso y la forma de la semilla, lo cual indica que estos rasgos se podrían usar como indicadores de adaptación en zonas áridas y semiáridas (Wang et al., 2025). En este contexto, algunas especies de gramíneas nativas del Altiplano Tamaulipeco, México, presentan características ecológicas y forrajeras deseables. *Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr. destaca por su tolerancia a la sequía y su valor forrajero, así como por su contenido de proteína cruda (PC: 9 a 12 %) y fibra (detergente neutro [FDN] y ácido [FDA] de 72 y 36 %, respectivamente) (Álvarez-Holguín et al., 2021). *Disakisperma dubium* (Kunth) P.M. Peterson & N. Snow se adapta a suelos pobres y someros (Ramírez-Segura et al., 2025). *Muhlenbergia phleoides* (Kunth) Columbus presenta alto valor forrajero en etapas tempranas de desarrollo (7.9, 75 y 36 % de PC, FDN y FDA, respectivamente) (Márquez-Godoy et al., 2022). *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths es una especie emblemática de los pastizales semiáridos, y es apreciada por su rusticidad y resistencia al pastoreo, con PC de 8.5 a 18 %, FDN de 72 % y FDA de 37 % (Morales-Nieto et al., 2022). Finalmente, *Setaria macrostachya* Kunth produce cantidades elevadas de biomasa, aunque con calidad decreciente en estados avanzados de madurez (PC = 11-15 %, FDN = 63-73 % y FDA = 38-42 %; Ramírez-Segura et al., 2025).

La caracterización de estos ecotipos es esencial para evaluar su potencial en programas de rehabilitación y manejo forrajero sostenible. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad física y fisiológica de cariósides de ecotipos pertenecientes a cinco especies de gramíneas nativas del Altiplano Tamaulipeco, México.

Materiales y métodos

Localización y ecotipos evaluados



El estudio se realizó en el Altiplano Tamaulipeco, México, localizado en la Sierra Madre Oriental. La región presenta una altitud de 1 200 a más de 3 000 m, lo que genera gradientes ambientales marcados. Los suelos dominantes son leptosoles y regosoles, poco profundos y de textura media a fina, asociados con calcisoles y cambisoles en laderas y con vertisoles en valles y planicies; también se reportan gypsisoles y solonchaks en zonas con acumulación de sales. El clima es semiárido templado, con lluvias en verano (junio a septiembre) que aportan entre 400 y 600 mm anuales. La temperatura media anual oscila entre 16 y 20 °C en valles y descende a menos de 12 °C en cimas. La región presenta una marcada oscilación térmica diaria y estacional; los inviernos son fríos y los veranos cálidos, con heladas de noviembre a marzo que ocurren de 20 a 40 veces por año (INEGI, 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e).

En septiembre de 2024 se recolectaron ramas y espiguillas de catorce ecotipos pertenecientes a cinco especies de pastos nativos con potencial forrajero (Cuadro 1) en agostaderos del Altiplano Tamaulipeco ubicados en los municipios de Jaumave, Bustamante, Palmillas, Tula y Miquihuana (Figura 1). Los análisis de calidad física y fisiológica de los propágulos se realizaron en el Laboratorio de Forrajes y Nutrición Animal del Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP (22° 33' 59.0'' N y 98° 09' 50.3'' O).

Cuadro 1. Ecotipos y ubicación de las recolectas en 2024 en el Altiplano Tamaulipeco, México.

Nombre común	Nombre científico	Ecotipo	Coordenadas	Altitud (m)
Banderita	<i>Bouteloua curtipendula</i>	BALT	23° 29' 05.8'' N, 99° 38' 27.1'' O	1 707
		BECP	23° 18' 19.4'' N, 99° 40' 09.3'' O	1 798
		BEST	23° 21' 16.2'' N, 99° 31' 00.1'' O	1 168
		BLFR	23° 22' 28.5'' N, 99° 29' 00.1'' O	1 010
		BTOM	22° 58' 22.7'' N, 99° 36' 53.1'' O	1 290
Gigante	<i>Disakisperma dubia</i>	GECP	23° 18' 22.1'' N, 99° 40' 09.2'' O	1 801
		GEST	23° 21' 25.6'' N, 99° 30' 56.5'' O	1 162
Lobero	<i>Muhlenbergia phleoides</i>	LECP	23° 17' 36.6'' N, 99° 40' 03.6'' O	1 757
		LLPT	23° 33' 32.2'' N, 99° 42' 04.0'' O	1 803



Navajita	<i>Bouteloua gracilis</i>	LVHR	23° 40' 20.6'' N, 99° 45' 32.5'' O	2 533
		NLMR	23° 40' 33.9'' N, 99° 48' 06.8'' O	2 481
		NVHR	23° 40' 20.6'' N, 99° 47' 36.7'' O	2 457
Tempranero	<i>Setaria macrostachya</i>	TTES	23° 03' 46.7'' N, 99° 41' 47.1'' O	1 284
		TSAT	23° 02' 16.9'' N, 99° 39' 47.4'' O	1 319

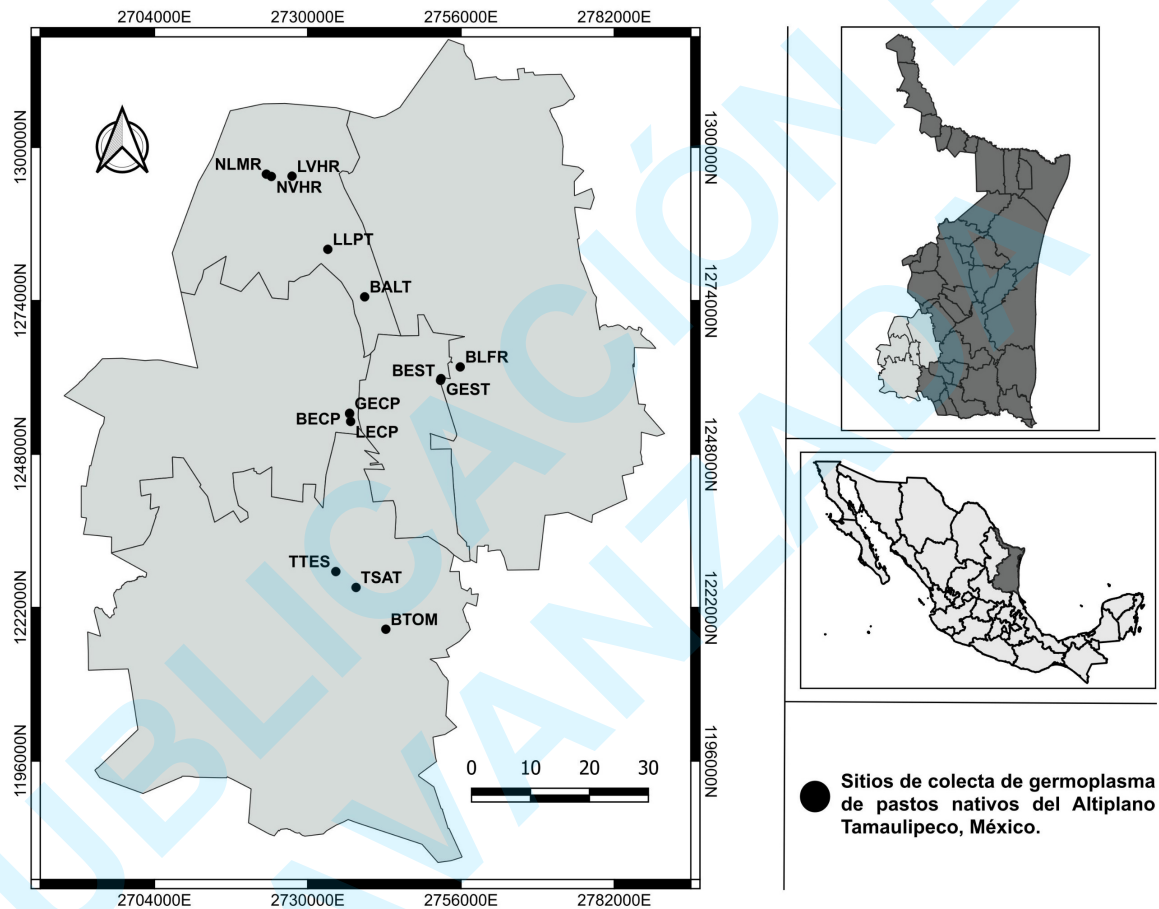


Figura 1. Mapa de los sitios de las recolectas de germoplasma de gramíneas nativas del Altiplano Tamaulipeco, México. Banderita (*Bouteloua curtipendula*: BALT, BECP, BEST, BLFR y BTOM), gigante (*Disakisperma dubia*: GEC y GEST), lobo (*Muhlenbergia phleoides*: LEC, LLPT y LVHR), navajita (*Bouteloua gracilis*: NLMR y NVHR) y temprano (*Setaria macrostachya*: TTES y TSAT).



Determinación de la calidad física

Se tomaron 5 g de muestra de cada ecotipo seleccionado y se le retiraron las brácteas accesorias (consideradas como material inerte o impurezas) hasta obtener únicamente las cariósides. El peso de 1 000 cariósides (PMC) se determinó mediante ocho repeticiones de 100 unidades cada una, las cuales se pesaron en una balanza analítica (HR-250AZ, A&D Weighing, Japón) de acuerdo con la metodología propuesta por Álvarez-Vázquez et al. (2022). Se calculó el coeficiente de variación entre repeticiones y, cuando fue inferior al 6 %, el dato se consideró válido (Rivas-Jacobo et al., 2017). Con base en el PMC, se estimó el número de cariósides por kilogramo ($NC \cdot kg^{-1}$) de acuerdo con la metodología descrita por la *International Seed Testing Association* (ISTA, 2023) mediante la siguiente fórmula:

$$NC \cdot kg^{-1} = \frac{1\,000}{PMC}$$

La morfología de las cariósides se evaluó a partir de las medidas del largo (LC) y ancho (AC). Para ello, se seleccionaron al azar 15 semillas por ecotipo, se colocaron en un portaobjetos graduado, se observaron con un microscopio estereoscópico y se fotografiaron para su análisis. El LC y AC se determinaron con el programa ImageJ y se expresaron en micrómetros (μm).

Determinación de la calidad fisiológica



La germinación (GER) se evaluó con cuatro repeticiones de 100 cariósides por ecotipo. Las semillas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 1.5 % por 2 min, se colocaron en toallas de papel humedecidas con agua destilada dentro de cajas Petri y se incubaron en una estufa a 25 ± 2 °C. La semilla se consideró germinada cuando presentó ruptura de la cariósida y se observó presencia de la radícula o plúmula. Los registros se realizaron a los 4 y 7 días después de la siembra (dds).

Análisis estadístico

Las variables se analizaron bajo un diseño completamente al azar con el procedimiento GLM en el programa SAS ver. 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). Cuando se observaron diferencias significativas, los datos se sometieron a una comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Además, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables cuantitativas, así como un análisis de agrupamiento jerárquico utilizando el método de Ward y la distancia euclidiana. Estos análisis se realizaron con las funciones *linkage* y *dendrogram* del paquete SciPy dentro del entorno Jupyter Notebook con el programa Python 3.13 (Python Software Foundation, 2024). Los resultados se presentaron mediante mapas de color y dendrogramas con ayuda de las bibliotecas *matplotlib* y *seaborn* (Virtanen et al., 2020).

Resultados y discusión

Calidad física



El ecotipo TTES presentó el mayor PMC (770 mg), mientras que los ecotipos LECP, LLPT, LVHR tuvieron los valores más bajos, entre 100 y 120 mg (Cuadro 2). Álvarez-Vázquez et al. (2022) reportaron un PMC de 1 020 mg en tempranero; sin embargo, este material se cosechó un año después de su establecimiento con manejo agronómico y condiciones de riego, lo cual pudo favorecer el llenado de la semilla. En contraste, López-Velázquez et al. (2023) obtuvieron un PMC de 12 mg en lobero, valor muy por debajo de lo observado en el presente estudio.

Cuadro 2. Comparación de medias de las características físicas de cariósides de 14 ecotipos de pastos nativos recolectados en 2024 en el Altiplano Tamaulipeco, México.

Nombre común	Ecotipo	PMC (mg)	Tamaño de cariósida (µm)		NC kg ⁻¹ (millones)
			Ancho	Largo	
Banderita	BALT	400 ± 1.0 fg	645 ± 22 cd	2 522 ± 56 a	2.49 ± 0.06 de
	BECP	430 ± 1.4 ef	714 ± 24 c	2 510 ± 25 a	2.34 ± 0.08 def
	BEST	510 ± 0.8 cd	709 ± 08 c	2 568 ± 51 a	1.97 ± 0.03 fg
	BLFR	500 ± 2.6 cd	679 ± 19 cd	2 588 ± 56 a	2.02 ± 0.11 ef
	BTOM	480 ± 0.6 de	624 ± 20 de	2 621 ± 59 a	2.10 ± 0.03 ef
Gigante	GECP	540 ± 1.0 c	1 065 ± 20 ab	2 179 ± 39 c	1.84 ± 0.04 fg
	GEST	520 ± 0.5 cd	1 017 ± 20 b	2 259 ± 31 bc	1.91 ± 0.02 fg
Lobero	LECP	100 ± 0.1 i	307 ± 08 g	1 745 ± 22 de	10.16 ± 0.14 a
	LLPT	120 ± 0.2 i	329 ± 09 g	1 953 ± 37 d	8.44 ± 0.13 b
	LVHR	100 ± 0.3 i	308 ± 06 g	1 664 ± 19 e	9.90 ± 0.26 a
Navajita	NLMR	320 ± 1.4 h	547 ± 17 ef	2 587 ± 54 a	3.13 ± 0.13 c
	NVHR	360 ± 0.6 gh	534 ± 17 f	2 430 ± 82 ab	2.81 ± 0.05 cd
Tempranero	TTES	770 ± 0.9 a	1 132 ± 23 a	1 396 ± 35 f	1.30 ± 0.02 h
	TSAT	670 ± 0.4 b	1 065 ± 19 ab	1 355 ± 39 f	1.49 ± 0.01 gh
Valor de <i>p</i>		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001



PMC: peso de 1 000 cariósides; CN: número de cariósides. Promedio $\pm$ error estándar.

Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencia significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto a la morfología de la cariósida, el ecotipo TTES fue el más ancho (1 132 μm), mientras que los ecotipos LECP, LLPT y LVHR presentaron los valores más bajos, entre 307 y 329 μm (Cuadro 2). Respecto a la longitud, los cinco ecotipos de la especie banderita y los dos de navajita mostraron los valores más altos (entre 2 510 y 2 621 μm), en contraste con los ecotipos TTES y TSAT de la especie tempranero, los cuales presentaron las cariósides más cortas (entre 1 355 y 1 396 μm), probablemente debido a su forma redondeada (Cuadro 2).

En algunos estudios se ha señalado que las semillas de mayor tamaño y peso exhiben mayor capacidad germinativa (Hernández-Guzmán et al., 2021). Sin embargo, se ha reportado que las semillas oblongas y alargadas son más susceptibles a sufrir daños físicos durante procesos de escarificación física o mecánica, lo cual puede dañar el embrión y, por tanto, afectar la germinación (Ramírez-Segura et al., 2022).

Los ecotipos LECP y LVHR de la especie lobero presentaron el mayor NC por kilogramo (10.16 y 9.9 millones, respectivamente), mientras que TTES y TSAT de la especie tempranero presentaron los valores más bajos (1.30 y 1.49 millones, respectivamente) (Cuadro 2). Estas diferencias se pueden atribuir a factores como la especie, la fecha de cosecha, las condiciones climáticas del sitio de recolecta, así como el tipo y uso del suelo (López-Velázquez et al., 2023).

Calidad fisiológica

En la prueba de germinación, los ecotipos BEST, BLFR, BTOM y NVHR presentaron los valores más altos a los 4 dds (entre 46 y 58 %), con un comportamiento similar a los 7 dds (entre 48 y 67 %) ($p < 0.001$; Cuadro 3). De acuerdo con Gutiérrez-Gutiérrez et al. (2022), el pasto banderita presenta mayor velocidad de germinación en comparación con gigante, lo cual



constituye una ventaja adaptativa en zonas áridas y semiáridas, ya que el desarrollo temprano de la radícula permite aprovechar de manera más eficiente la disponibilidad temporal de agua. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Ramírez-Segura et al. (2022), quienes encontraron que la especie banderita presenta un porcentaje de germinación mayor (hasta 90 %) en menor tiempo, en comparación con tempranero (20 %) y gigante (77 %). Hernández-Guzmán et al. (2021) evaluaron el efecto del tamaño de la cariósida en la germinación de banderita y navajita, y observaron que las cariósidas grandes alcanzaron valores de germinación mayores (98 y 87 %, respectivamente) que las cariósidas chicas (63 y 37 %, respectivamente).

Cuadro 3. Comparación de medias del porcentaje de germinación a los 4 y 7 días después de la siembra (dds) de 14 ecotipos de pastos nativos recolectados en 2024 en el Altiplano Tamaulipeco, México.

Nombre común	Ecotipo	Germinación (%)	
		4 dds	7 dds
Banderita	BALT	20 ± 3.1 d	24 ± 3.7 cd
	BECP	26 ± 4.4 cd	33 ± 4.4 bc
	BEST	55 ± 6.0 a	65 ± 4.5 a
	BLFR	51 ± 1.7 a	69 ± 5.2 a
	BTOM	58 ± 0.6 a	67 ± 2.5 a
Gigante	GECP	37 ± 3.4 bc	39 ± 4.6 bc
	GEST	7 ± 0.4 ef	8 ± 0.5 e
Lobero	LECP	3 ± 1.1 ef	9 ± 1.3 de
	LLPT	7 ± 0.5 ef	9 ± 0.5 de
	LVHR	3 ± 1.0 f	7 ± 0.6 e
Navajita	NLMR	16 ± 2.2 de	16 ± 2.2 de
	NVHR	46 ± 2.4 ab	48 ± 3.7 a
Tempranero	TTES	0 ± 0.0 f	4 ± 0.8 e
	TSAT	2 ± 0.6 f	17 ± 2.5 de
Valor de <i>p</i>		<0.0001	<0.0001



Promedio $\pm$ error estándar. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencia significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los ecotipos TTES y TSAT presentaron la menor germinación a los 4 dds (0 y 2 %, respectivamente) (Cuadro 3). Esto coincide con lo reportado por Ramírez-Segura et al. (2022), quienes mencionan que el pasto temprano no rebasó el 10 % de germinación durante 10 días de evaluación. Este comportamiento se atribuye a la latencia característica de la especie, la cual le impide alcanzar el 100 % de germinación incluso bajo condiciones óptimas (Osuna et al., 2015; Pausas & Lamont, 2022).

A los 7 dds, los ecotipos GEST, LECP, LLPT, LVHR, NLMR, TTES y TSAT tuvieron los valores de germinación más bajos (4 a 17 %; Cuadro 3). López-Velázquez et al. (2023) reportaron una germinación de 20 % en cariósides de lobero, mientras que gigante y navajita alcanzaron valores de 65 y 62 %, respectivamente. El proceso de germinación está regulado por múltiples factores intrínsecos, como el contenido de reservas energéticas en la semilla (López-Velázquez et al., 2023; Quero-Carrillo et al., 2016), la regulación hormonal y la expresión de genes asociados al proceso (Miransari & Smith, 2014). Asimismo, las condiciones edáficas influyen en la absorción de los nutrientes destinados a la formación de semillas y resultan críticas en los primeros días después de la siembra, cuando el desarrollo radical inicial define la capacidad de absorción de agua (Hernández-Guzmán et al., 2015).

La viabilidad alta, la germinación rápida y el vigor en el establecimiento representan una ventaja adaptativa, ya que permiten el desarrollo adecuado de plántulas y la formación de coronas bien establecidas, capaces de producir tallos vegetativos y reproductivos en menor tiempo (Hernández-Guzmán et al., 2021). No obstante, no se recomienda retirar las brácteas accesorias cuando el propósito es el almacenamiento del material, pues estas estructuras actúan como barreras protectoras frente a variaciones ambientales y mantienen la viabilidad de las cariósides. En este sentido, Velázquez et al. (2015) obtuvieron hasta 97 % de germinación en semillas no escarificadas almacenadas por 16 meses.

Correlación de Pearson y agrupamiento jerárquico

El análisis de correlación permitió identificar relaciones significativas ($p < 0.05$) entre las características físicas y fisiológicas de los ecotipos evaluados (Figura 2). Se observó una correlación positiva fuerte entre el PMC y el AC ($r = 0.93$), lo cual sugiere que el AC influye directamente en la masa de la semilla, posiblemente asociado a la cantidad de carbohidratos de reserva (Márquez-Godoy et al., 2025). En contraste, el PMC se correlacionó negativamente con el NC ($r = -0.89$); esto es fisiológicamente congruente, ya que, a mayor peso y tamaño individual, menor cantidad de semillas por unidad de peso (Hernández-Guzmán et al., 2021; Márquez-Godoy et al., 2025). Asimismo, se registró una correlación negativa entre el AC y el NC ($r = -0.89$), y una correlación positiva entre la germinación y el LC ($r = 0.68$), lo cual podría indicar una tendencia de los ecotipos con semillas más largas a presentar mayor capacidad germinativa.

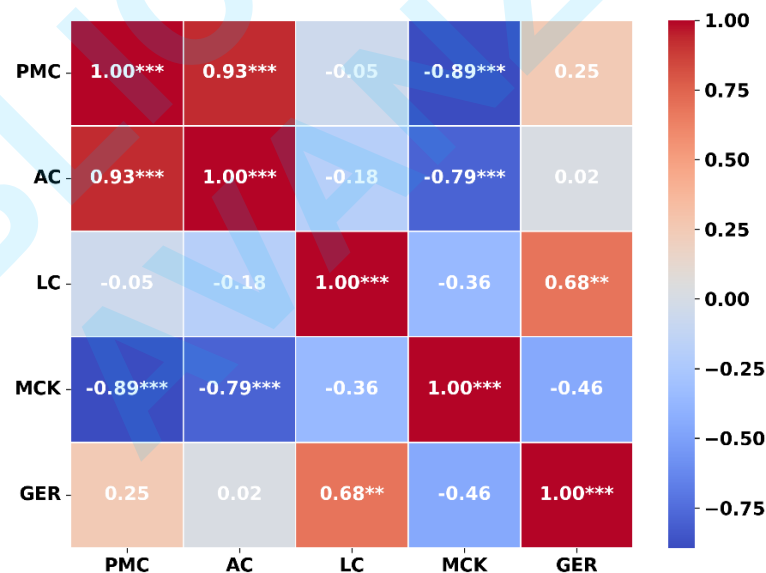


Figura 2. Correlación de Pearson entre variables físicas y fisiológicas de 14 ecotipos de pastos nativos recolectados en 2024 en el Altiplano Tamaulipeco, México. PMC: peso de mil



cariópsides; AC: ancho de la carióspside; LC: largo de la carióspside; NC: número de cariópsides por kilogramo; GER: germinación.

El análisis de agrupamiento jerárquico permitió identificar cinco grupos diferenciados fenotípicamente entre los ecotipos evaluados (Figura 3). Cada grupo presentó patrones distintivos en las variables morfológicas y fisiológicas, lo cual refleja una diversidad estructural significativa dentro del material genético estudiado. El Grupo 1 estuvo conformado por ecotipos del complejo *Bouteloua* (BECP, BALT, NLMR y NVHR), los cuales se caracterizaron por presentar semillas pequeñas (PMC = 380 mg), mayor NC (2.69 millones·kg⁻¹) (Cuadro 2) y germinación moderada (30 %) (Cuadro 3). Esta combinación de atributos sugiere su potencial para programas orientados a la producción de semilla bajo un manejo agronómico planificado (López-Velázquez et al., 2023). El Grupo 2 incluyó a los ecotipos GEST y GECP, caracterizados por una morfología más desarrollada, con mayor PMC (530 mg) y germinación promedio de 23.5 % (Cuadro 3). Este perfil se podría asociar con mayor vigor inicial y capacidad de establecimiento; sin embargo, es necesario realizar evaluaciones que incluyan desarrollo vegetativo, capacidad de rebrote, atributos forrajeros, valor nutricional y su desempeño en diferentes ambientes (Márquez-Godoy et al., 2025).

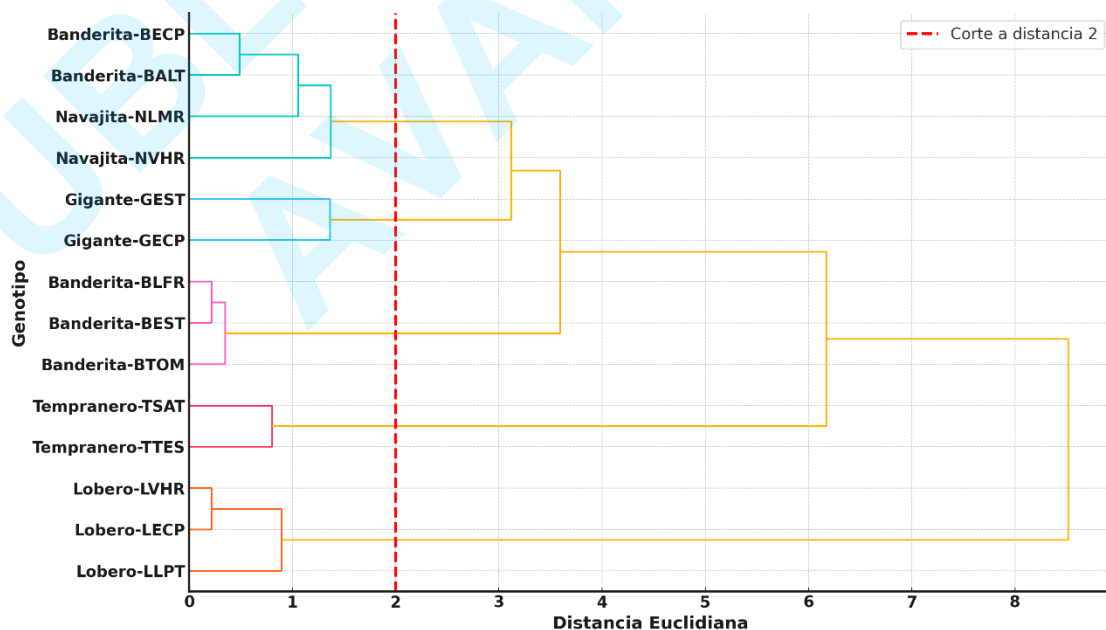




Figura 3. Dendrograma jerárquico generado con el método de Ward y distancia euclidiana, a partir de variables morfológicas y fisiológicas de cariósides de 14 ecotipos de pastos nativos recolectados en 2024 en el Altiplano Tamaulipeco, México.

El Grupo 3, integrado por BLFR, BEST y BTOM, mostró una diferenciación clara dentro de la misma especie, lo cual evidencia variabilidad intraespecífica. Estos ecotipos presentaron un PMC promedio de 490 mg, y dimensiones de cariósides de 67 μm de ancho y 2 592 μm de largo (Cuadro 2), además de registrar la mayor germinación (67 %) (Cuadro 3). Dichas características sugieren un alto potencial para programas de producción de semilla, al combinar buena calidad física y fisiológica (Hernández-Guzmán et al., 2021). El Grupo 4, conformado por TSAT y TTES, presentó un comportamiento uniforme, con las semillas más anchas (1 098 μm) y PMC de 720 mg (Cuadro 2), pero con una germinación notablemente más baja (10.5 %) (Cuadro 3). Esta discrepancia confirma que el mayor tamaño de la semilla no se correlaciona con una mayor viabilidad, lo cual concuerda con lo reportado en otras especies forrajeras (Hernández-Guzmán et al., 2021; López-Velázquez et al., 2023; Quero-Carrillo et al., 2017).

Finalmente, el Grupo 5, integrado por LVHR, LECP y LLPT, se caracterizó por presentar semillas pequeñas y ligeras (PMC = 100 mg), con una densidad aproximada de 9.5 millones de cariósides por kilogramo (Cuadro 2), y baja germinación (8.3 %) (Cuadro 3). Estos rasgos se pueden interpretar como adaptaciones a ambientes ecológicamente restrictivos, donde la elevada cantidad de semillas por unidad de masa actúa como un mecanismo compensatorio de propagación frente a limitaciones fisiológicas (López-Velázquez et al., 2023; Márquez-Godoy et al., 2025). No obstante, la baja viabilidad y germinación restringen su aprovechamiento en programas de producción de semillas.

Conclusiones



Los resultados evidencian la diversidad de los pastos nativos del Altiplano Tamaulipeco, donde cada ecotipo mostró atributos particulares en el tamaño y en la calidad fisiológica de sus semillas. Esta variabilidad constituye un recurso genético valioso y abre la posibilidad de seleccionar materiales con mayor potencial para la restauración de pastizales o para la producción de semillas adaptadas a condiciones específicas. Un hallazgo importante fue que el mayor tamaño de la semilla, como en el ecotipo TTES, no siempre se asocia con mayor germinación. En conjunto, los resultados proporcionan herramientas prácticas para la toma de decisiones en campo, al orientar sobre qué ecotipos sembrar, cómo manejarlos y qué expectativas productivas considerar.

Referencias

- Álvarez-Holguín, A., Morales-Nieto, C. R., Corrales-Lerma, R., Prieto-Amparán, J. A., Villarreal-Guerrero, F., & Sánchez-Gutiérrez, R. A. (2021). Genetic structure and temporal environmental niche dynamics of sideoats grama [*Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr.] populations in Mexico. *PLoS ONE*, 16(7), e0254566. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254566>
- Álvarez-Vázquez, P., Rojas-García, A. R., Joaquín-Cancino, S., Velázquez-Martínez, M., Rodríguez-Ortega, L. T., & Hernández-Guzmán, F. J. (2022). Producción de forraje y semilla de ocho pastos al establecimiento en Tulancingo, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(6), 1041-1053. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i6.3027>
- Gutiérrez-Gutiérrez, O. G., Rivero-Hernández, O., Vega-Mares, J. H., & Melgoza-Castillo, A. (2022). Germination patterns on grasses present at the Chihuahuan Desert. *Botanical Sciences*, 100(4), 989-999. <https://doi.org/10.17129/botsci.3007>
- Hernández-Guzmán, F. J., Quero-Carrillo, A. R., Pérez-Rodríguez, P., Velázquez-Martínez, M., & García-de los Santos, G. (2015). Germinación y emergencia de propágulos de pasto en respuesta a pruebas de vigor. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6(7), 1519-1532. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000700008



- Hernández-Guzmán, F. J., Rodríguez-Ortega, L. T., Velázquez-Martínez, M., Landa-Salgado, P., Rodríguez-Ortega, A., & Castrellón-Montelongo, J. L. (2021). Influencia del tamaño del cariósido y embrión en el desarrollo de plántulas de pastos. *Interciencia*, 46(7-8), 309-316. <https://www.redalyc.org/journal/339/33968402004/html/>
- Huss, J. C., & Gierlinger, N. (2021). Functional packaging of seeds. *New Phytologist*, 230(6), 2154-2163. <https://doi.org/10.1111/nph.17299>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2023). *International rules for seed testing*. ISTA. <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010a). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Jaumave, Tamaulipas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28017.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010b). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Bustamante, Tamaulipas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28006.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010c). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Miquihuana, Tamaulipas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28026.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010d). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Palmillas, Tamaulipas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28031.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010e). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Tula, Tamaulipas*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28039.pdf
- López-Velázquez, M. M., Ramírez-Segura, E., Sánchez-Gutiérrez, R. A., Joaquín-Cancino, S., Muñoz-Salas, L. C., & Gayosso-Barragán, O. (2023). Parámetros de calidad en propágulos de pastos nativos e introducidos cosechados en sequía. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 46, 487-496. <https://doi.org/10.35196/rfm.2023.4A.496>



- Márquez-Godoy, J. N., Corrales-Lerma, R., Álvarez-Holguín, A., Villarreal-Guerrero, F., Santellano-Estrada, E., Pinedo-Álvarez, A., & Morales-Nieto, C. R. (2022). Diversidad morfológica y nutricional de poblaciones de pasto lobero (*Muhlenbergia phleoides* [Kunth] Columbus) en Chihuahua, México. *Acta Universitaria*, 32, e3404. <https://doi.org/10.15174/au.2022.3404>
- Márquez-Godoy, J. N., Ramírez-Segura, E., Garay-Martínez, J. R., Aguirre-Gutiérrez, C. A., & García-Cervantes, D. (2025). Morfología de cariósides de pastos forrajeros nativos de zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.63728/riisds.v11i1.78>
- Miransari, M., & Smith, D. L. (2014). Plant hormones and seed germination. *Environmental and Experimental Botany*, 99, 110-121. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.11.005>
- Morales-Nieto, C. R., Villarreal-Guerrero, F., Jurado-Guerra, P., Ochoa-Rivero, J. M., Prieto-Amparán, J. A., Corrales-Lerma, R., Pinedo-Alvarez, A., & Álvarez-Holguín, A. (2022). Environmental niche dynamics of blue grama (*Bouteloua gracilis*) ecotypes in northern Mexico: Genetic structure and implications for restoration management. *Plants*, 11(5), 684. <https://doi.org/10.3390/plants11050684>
- Osuna, D., Prieto, P., & Aguilar, M. (2015). Control of seed germination and plant development by carbon and nitrogen availability. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01023>
- Pausas, J. G., & Lamont, B. B. (2022). Fire-released seed dormancy – a global synthesis. *Biological reviews*, 97(4), 1612-1639. <https://doi.org/10.1111/brv.12855>
- Portuguez-García, M. P., Rodríguez-Ruiz, A. M., Porras-Martínez, C., & González-Lutz, M. I. (2020). Efecto de la temperatura y la escarificación sobre la germinación de *Ischaemum rugosum* Salisb. *Agronomía Mesoamericana*, 31(2), 491-498. <https://doi.org/10.15517/am.v31i2.38417>
- Python Software Foundation. (2024). *Python language reference, ver. 3.13* [software]. Python. <https://docs.python.org/3/reference/>
- Quero-Carrillo, A. R., Hernández-Guzmán, F. J., Pérez-Rodríguez, P., Hernández-Livera, A., García-de los Santos, G., Landa-Salgado, P., & Ramírez-Sánchez, S. E. (2017).



- Germinación de cariósides clasificados por tamaño y diásporas de cuatro pastos para temporal semiárido. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(3), 489-502. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i3.26>
- Quero-Carrillo, A. R., Hernández-Guzmán, F. J., Velázquez-Martínez, M., Gámez-Vázquez, H. G., Landa-Salgado, P., & Aguilar-López, P. (2016). Métodos de establecimiento de pasturas en zonas áridas de México utilizando semillas crudas o cariósides. *Tropical Grasslands*, 4(1), 29-37. [https://doi.org/10.17138/TGFT\(4\)29-37](https://doi.org/10.17138/TGFT(4)29-37)
- Ramírez-Segura, E., Maldonado-Jaquez, J. A., Torres-Salas, I., & Quero-Carrillo, A. R. (2022). Atributos físicos y fisiológicos de semilla de pastos nativos del México árido. *Revista Fitotecnia de México*, 45(4), 453-460. <https://doi.org/10.35196/rfm.2022.4.453>
- Ramírez-Segura, E., Márquez-Godoy, J. N., & Velázquez-Martínez, M. (2025). *Gramíneas de importancia forrajera en zonas áridas y semiáridas de México*. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Rivas-Jacobo, M., Sandoval-Alvarado, J., Herrera-Corredor, A., Marín-Sánchez, J., Escalera-Valente, F., & Loya-Olguín, J. (2017). Evaluación de semillas de pastos cosechados en caminos y campos de cultivos. *Abanico Veterinario*, 8(1), 36-46. <https://doi.org/10.21929/abavet2018.81.3>
- SAS Institute, Inc. (2002). *SAS/STAT® 9.0 user's guide* [software]. SAS Institute, Inc. https://www.sas.com/es_mx/home.html
- Velázquez, M., Hernández, G. F., Cervantes, B. J., & Gámez, V. H. (2015). *Establecimiento de pastos nativos e introducidos en zonas semiáridas de México*. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., & Van der Walt, S. J. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Wang, R., Yang, Y., Wang, X., Li, J., Gao, Y., Huang, H., Zhou, Z., Wang P., & Zhao, L. (2025). Response of seed germination and seedling growth of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) to drought, salinity, and pH in Karst regions. *Scientific Reports* 15, 16874. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01539-5>