



Physical and physiological quality of native grass ecotypes from the Tamaulipas Highlands for the rehabilitation of semiarid areas

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

Jesús E. Ochoa-Lechuga¹; Edith Ramírez-Segura²; Fernando Lucio-Ruiz³; Santiago Joaquín-Cancino¹; Benigno Estrada-Drouaillet¹; Andrés G. Limas-Martínez¹; Jonathan R. Garay-Martínez^{4*}

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.

*Corresponding author: garay.jonathan@inifap.gob.mx; tel. 553 871 8700, ext. 83315.

Abstract

The physical and physiological characterization of seeds is essential for selecting plant materials with potential for grassland rehabilitation. The objective of this study was to evaluate the physical and physiological quality of caryopses from ecotypes belonging to five native grass species from the Tamaulipas Highlands, Mexico. Propagules from 14 ecotypes were collected, and the following parameters were measured: weight of 1000 caryopses, caryopsis length and width, number of caryopses per kilogram, and germination percentage. Data were analyzed using a completely randomized design, and when significant differences were found, the Tukey's test was applied ($\alpha = 0.05$). The TTES ecotype showed the highest 1000-caryopsis weight (770 mg). The LECP, LLPT, and LVHR ecotypes, from the Lobero species, had more than 8.4 million caryopses per kilogram. In terms of germination, three Banderita ecotypes (BEST [65 %], BLFR [51 %], and BTOM [58 %]) and one Navajita ecotype (NVHR [46 %]) stood out, all of which also had higher caryopsis weight. These ecotypes show favorable physical traits and high germination capacity, making them suitable for rangeland rehabilitation programs and the production of high-quality native seeds.

Keywords: propagules, caryopses, ecotypes, germination.

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 1000 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 1000 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.

Please cite this article as follows (APA 7): Ochoa-Lechuga, J. E., Ramírez-Segura, E., Lucio-Ruiz, F., Joaquín-Cancino, S., Estrada-Drouaillet, B., Limas-Martínez, A. G., & Garay-Martínez, J. R. (2025). Physical and physiological quality of native grass ecotypes from the Tamaulipas Highlands for the rehabilitation of semiarid areas. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 24, e2506. <https://doi.org/10.5154/r.rchsa.2025.07.06>



Revista Chapingo
Serie Zonas Áridas

Introduction

The restoration and establishment of native grasses in Mexico's arid and semi-arid regions face several constraints, primarily due to water shortages, as planting typically depends on seasonal rainfall. This environmental stress significantly hinders seed germination and seedling development (Ramírez-Segura et al., 2022). Moreover, temperature is a critical factor, germination will not proceed, even with sufficient moisture, unless optimal thermal conditions are achieved (Quero-Carrillo et al., 2016). Under favorable temperatures, essential biochemical processes are activated, promoting the development of key structures such as the plumule and radicle (Portuguez-García et al., 2020).

The physical quality of the propagule is another key factor influencing successful establishment. In forage grasses, propagules may include spikes, spikelets, branches, or caryopses. Commercially, entire spikes covered with accessory bracts (glumes, lemma, palea) are commonly used; however, these structures act as physical barriers that can reduce germination (Hernández-Guzmán et al., 2021). Additionally, dormancy serves as a mechanism that prevents germination even under favorable conditions, either due to embryo immaturity or the presence of physiological inhibitors (Ramírez-Segura et al., 2022).

The lack of domestication in many native grass species limits their agronomic management, making efficient production difficult and resulting in a limited supply and poor seed quality (López-Velázquez et al., 2023). Seed demand is influenced by the forage potential of the species, as well as by its physical and physiological quality, factors that determine seed viability, purity, and vigor (Rivas-Jacobo et al., 2017). These attributes are closely linked to management practices applied before, during, and after harvest (Ramírez-Segura et al., 2022). In this context, understanding seed physiological quality, plant ecology, and response to agronomic practices is essential for improving forage and seed production. For native grasses, this knowledge is especially important because it supports the conservation of genetic diversity and aids in developing conservation strategies for field establishment. It is crucial to implement appropriate storage, processing, and agronomic management practices – both in natural grasslands and cultivated areas – to support ecosystem restoration and the sustainability of extensive livestock systems (Huss & Gierlinger, 2021).

Recent studies suggest that germination responses to thermal and water stress are associated with seed weight and shape, indicating that these traits could be used as indicators of adaptation in arid and semi-arid regions (Wang et al., 2025). In this context,

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 carióspsides. 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

several native grass species from the Tamaulipas Highlands, Mexico, exhibit desirable ecological and forage characteristics. *Bouteloua curtipendula* (Michx.) Torr. stands out for its drought tolerance and forage value, with crude protein content (CP) ranging from 9 to 12 % and fiber content – neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) – at 72 % and 36 %, respectively (Álvarez-Holguín et al., 2021). *Disakisperma dubium* (Kunth) P.M. Peterson & N. Snow adapts well to poor and shallow soils (Ramírez-Segura et al., 2025). *Muhlenbergia phleoides* (Kunth) Columbus shows high forage value during early growth stages, with CP, NDF, and ADF levels of 7.9, 75, and 36 %, respectively (Márquez-Godoy et al., 2022). *Bouteloua gracilis* (Kunth) Lag. ex Griffiths is a flagship species of semi-arid grasslands, valued for its hardiness and grazing resistance, with CP ranging from 8.5 to 18 %, NDF at 72 %, and ADF at 37 % (Morales-Nieto et al., 2022). Finally, *Setaria macrostachya* Kunth produces high biomass yields, although its quality declines at advanced maturity stages (CP = 11-15 %, NDF = 63-73 % and ADF = 38-42 %; Ramírez-Segura et al., 2025).

Characterizing these ecotypes is crucial for determining their potential in restoration initiatives and sustainable forage management. Accordingly, this study aimed to assess the physical and physiological quality of caryopses from ecotypes of five native grass species from the Tamaulipas Highlands, Mexico.

Materials and methods

Location and evaluated ecotypes

The study was conducted in the Tamaulipas Highlands, Mexico, located in the Sierra Madre Oriental. The region features an elevation range from 1 200 to over 3 000 m, creating distinct environmental gradients. The dominant soils are leptosols and regosols, which are shallow with medium to fine texture, often found alongside calcisols and cambisols on slopes, and vertisols in valleys and plains; gypsisols and solonchaks are also reported in areas with salt accumulation. The climate is temperate semi-arid, with summer rains (June to September) providing between 400 and 600 mm annually. The average annual temperature ranges from 16 to 20 °C in the valleys and drops below 12 °C at the peaks. The region experiences significant daily and seasonal temperature fluctuations; winters are cold and summers warm, with frost occurring 20 to 40 times per year from November to March (INEGI, 2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e).

In September 2024, branches and spikelets were collected from fourteen ecotypes belonging to five native grass species with forage potential (Table 1) from rangelands in the Tamaulipas Highlands, specifically

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 desciende 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

Table 1. Ecotypes and collection sites in 2024 in the Tamaulipas Highlands, Mexico.

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

Common name / Nombre común	Scientific name / Nombre científico	Ecotype / Ecotipo	Coordinates / Coordenadas	Elevation (m) / Altitud (m)
Banderita	<i>Bouteloua curtipendula</i>	BALT	23° 29' 05.8" N, 99° 38' 27.1" W	1707
		BECP	23° 18' 19.4" N, 99° 40' 09.3" W	1798
		BEST	23° 21' 16.2" N, 99° 31' 00.1" W	1168
		BLFR	23° 22' 28.5" N, 99° 29' 00.1" W	1010
		BTOM	22° 58' 22.7" N, 99° 36' 53.1" W	1290
Gigante	<i>Disakisperma dubium</i>	GECP	23° 18' 22.1" N, 99° 40' 09.2" W	1801
		GEST	23° 21' 25.6" N, 99° 30' 56.5" W	1162
Lobero	<i>Muhlenbergia phleoides</i>	LECP	23° 17' 36.6" N, 99° 40' 03.6" W	1757
		LLPT	23° 33' 32.2" N, 99° 42' 04.0" W	1803
		LVHR	23° 40' 20.6" N, 99° 45' 32.5" W	2533
Navajita	<i>Bouteloua gracilis</i>	NLMR	23° 40' 33.9" N, 99° 48' 06.8" W	2481
		NVHR	23° 40' 20.6" N, 99° 47' 36.7" W	2457
Tempranero	<i>Setaria macrostachya</i>	TTES	23° 03' 46.7" N, 99° 41' 47.1" W	1284
		TSAT	23° 02' 16.9" N, 99° 39' 47.4" W	1319

in the municipalities of Jaumave, Bustamante, Palmillas, Tula, and Miquihuana (Figure 1). Physical and physiological quality analyses of the propagules were conducted at the Forage and Animal Nutrition Laboratory of the Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP (22° 33' 59.0" N and 98° 09' 50.3" W).

Determination of physical quality

A total of 5 grams of sample from each selected ecotype was taken, and accessory bracts (considered inert material or impurities) were removed to isolate only the caryopses. The weight of 1000 caryopses (WTC) was determined using eight replications of 100 units each, weighed on an analytical balance (HR-250AZ, A&D Weighing, Japan), following the methodology proposed by Álvarez-Vázquez et al. (2022). The coefficient of variation among replicates was calculated, and when it was below 6 %, the data were considered valid (Rivas-Jacobo et al., 2017). Based on the WTC, the number of caryopses per kilogram (NC·kg⁻¹) was estimated using the method described by the International Seed Testing Association (ISTA, 2023) with the following formula:

$$NC \cdot kg^{-1} = \frac{1000}{WTC}$$

Caryopsis morphology was evaluated based on length (CL) and width (CW) measurements. For this purpose, 15 seeds per ecotype were randomly selected, placed on a graduated microscope slide, observed under a stereoscopic microscope, and photographed for analysis. CL and CW were determined using the ImageJ software and expressed in micrometers (µm).

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).

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 carióspsides. El peso de 1000 carióspsides (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 carióspsides por kilogramo (NC·kg⁻¹) de acuerdo con la metodología descrita por la *International Seed Testing Association* (ISTA, 2023) mediante la siguiente fórmula:

$$NC \cdot kg^{-1} = \frac{1000}{PMC}$$

La morfología de las carióspsides 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

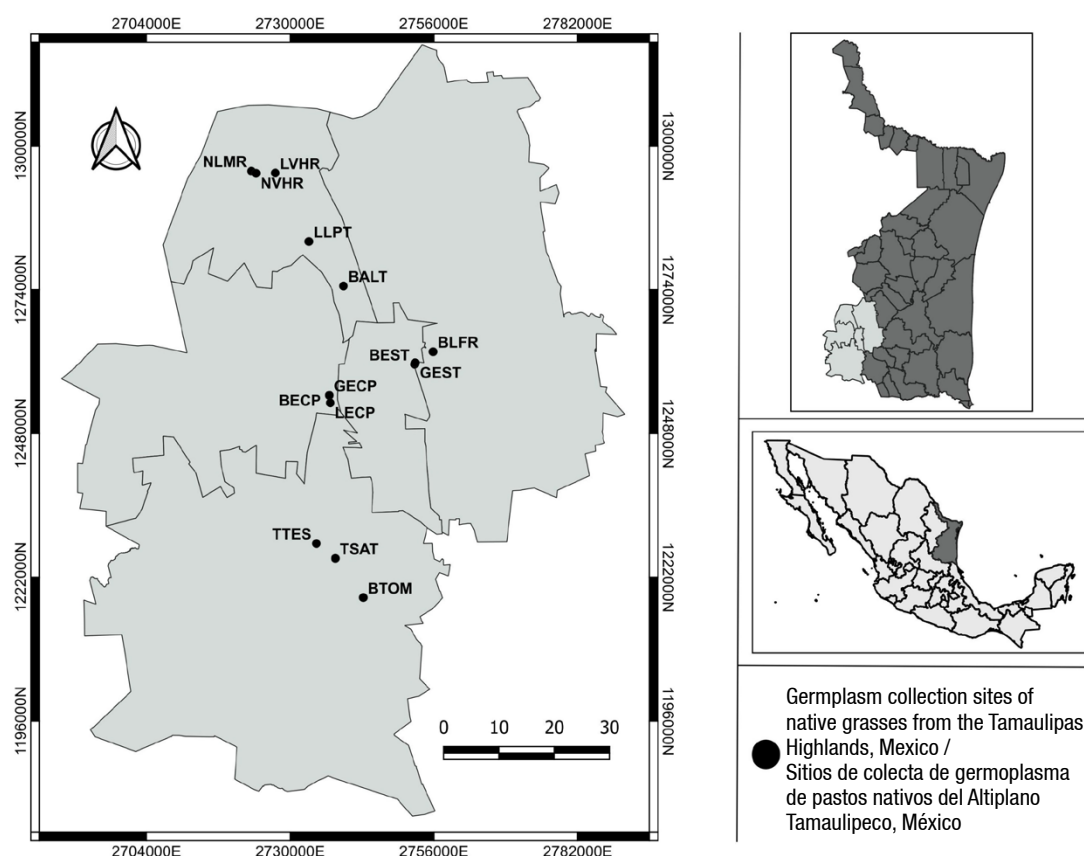


Figure 1. Map of germplasm collection sites for native grasses from the Tamaulipas Highlands, Mexico. Banderita (*Bouteloua curtipendula*: BALT, BECP, BEST, BLFR, and BTOM), Gigante (*Disakisperma dubium*: GEC and GEST), Lobero (*Muhlenbergia phleoides*: LEC, LLPT, and LVHR), Navajita (*Bouteloua gracilis*: NLMR and NVHR), and Tempranero (*Setaria macrostachya*: TTES and TSAT).

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 dubium*: GEC y GEST), lobero (*Muhlenbergia phleoides*: LEC, LLPT y LVHR), navajita (*Bouteloua gracilis*: NLMR y NVHR) y tempranero (*Setaria macrostachya*: TTES y TSAT).

Determination of physiological quality

Germination (GER) was evaluated using four replicates of 100 caryopses per ecotype. Seeds were disinfected with 1.5 % sodium hypochlorite for 2 min, placed on paper towels moistened with distilled water inside Petri dishes, and incubated in an oven at $25 \pm 2^\circ\text{C}$. A seed was considered germinated when the caryopsis ruptured and either the radicle or plumule was visible. Observations were recorded 4 and 7 days after sowing (das).

Statistical analysis

The variables were analyzed using a completely randomized design with the GLM procedure in SAS version 9.0 (SAS Institute Inc., 2002). When significant differences were detected, Tukey's mean comparison test was applied ($\alpha = 0.05$). In addition, Pearson correlation analysis was performed among quantitative variables, along with a hierarchical clustering analysis using

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 $25 \pm 2^\circ\text{C}$. 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

Ward’s method and Euclidean distance. These analyses were conducted using the *linkage* and *dendrogram* functions from the SciPy package within the Jupyter Notebook environment, running Python 3.13 (Python Software Foundation, 2024). Results were visualized through heatmaps and dendrograms using the matplotlib and seaborn libraries (Virtanen et al., 2020).

Results and discussion

Physical quality

The TTES ecotype showed the highest 1000-seed weight (WTC) at 770 mg, while the LECP, LLPT, and LVHR ecotypes had the lowest values, ranging between 100 and 120 mg (Table 2). Álvarez-Vázquez et al. (2022) reported a WTC of 1020 mg for Tempranero; however, that material was harvested one year after establishment under agronomic management and irrigation conditions, which may have favored seed filling. In contrast, López-Velázquez et al. (2023) obtained a WTC of just 12 mg for Lobero, a value significantly lower than those observed in the present study.

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 1020 mg en tempranero; sin embargo, este material se cosechó un año después de su establecimiento con

Table 2. Mean comparison of physical characteristics of caryopses from 14 native grass ecotypes collected in 2024 in the Tamaulipas Highlands, Mexico.

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.

Common name/ Nombre común	Ecotype/ Ecotipo	WTC (mg)/ PMC (mg)	Caryopsis Size (µm)/ Tamaño de cariósida (µm)		NC.kg ⁻¹ (millions)/ NC.kg ⁻¹ (millones)
			Width/ Ancho	Long/ Largo	
Banderita	BALT	400 ± 1.0 fg	645 ± 22 cd	2522 ± 56 a	2.49 ± 0.06 de
	BECP	430 ± 1.4 ef	714 ± 24 c	2510 ± 25 a	2.34 ± 0.08 def
	BEST	510 ± 0.8 cd	709 ± 08 c	2568 ± 51 a	1.97 ± 0.03 fg
	BLFR	500 ± 2.6 cd	679 ± 19 cd	2588 ± 56 a	2.02 ± 0.11 ef
	BTOM	480 ± 0.6 de	624 ± 20 de	2621 ± 59 a	2.10 ± 0.03 ef
Gigante	GECP	540 ± 1.0 c	1065 ± 20 ab	2179 ± 39 c	1.84 ± 0.04 fg
	GEST	520 ± 0.5 cd	1017 ± 20 b	2259 ± 31 bc	1.91 ± 0.02 fg
Lobero	LECP	100 ± 0.1 i	307 ± 08 g	1745 ± 22 de	10.16 ± 0.14 a
	LLPT	120 ± 0.2 i	329 ± 09 g	1953 ± 37 d	8.44 ± 0.13 b
	LVHR	100 ± 0.3 i	308 ± 06 g	1664 ± 19 e	9.90 ± 0.26 a
Navajita	NLMR	320 ± 1.4 h	547 ± 17 ef	2587 ± 54 a	3.13 ± 0.13 c
	NVHR	360 ± 0.6 gh	534 ± 17 f	2430 ± 82 ab	2.81 ± 0.05 cd
Tempranero	TTES	770 ± 0.9 a	1132 ± 23 a	1396 ± 35 f	1.30 ± 0.02 h
	TSAT	670 ± 0.4 b	1065 ± 19 ab	1355 ± 39 f	1.49 ± 0.01 gh
p-value / Valor de p		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

WTC: weight of 1000 caryopses; NC: number of caryopses. Mean ± standard error. Different letters in each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$). PMC: peso de 1000 cariósides; CN: número de cariósides. Promedio ± error estándar. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencia significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

Regarding caryopsis morphology, the TTES ecotype had the greatest width (1132 μm), while the LECP, LLPT, and LVHR ecotypes showed the lowest values, ranging from 307 to 329 μm (Table 2). In terms of length, the five ecotypes of the Banderita species and the two of Navajita exhibited the highest values (between 2510 and 2621 μm), in contrast to the TTES and TSAT ecotypes of the Tempranero species, which had the shortest caryopses (between 1355 and 1396 μm), likely due to their rounded shape (Table 2).

Some studies have indicated that larger and heavier seeds tend to show higher germination capacity (Hernández-Guzmán et al., 2021). However, it has also been reported that oblong and elongated seeds are more prone to physical damage during scarification processes (whether physical or mechanical), which can harm the embryo and consequently affect germination (Ramírez-Segura et al., 2022).

The LECP and LVHR ecotypes of the Lobero species showed the highest number of caryopses per kilogram (10.16 and 9.9 million, respectively), while TTES and TSAT of the Tempranero species had the lowest values (1.30 and 1.49 million, respectively) (Table 2). These differences may be attributed to factors such as species, harvest timing, climate conditions at the collection site, as well as soil type and usage (López-Velázquez et al., 2023).

Physiological quality

In the germination test, the ecotypes BEST, BLFR, BTOM, and NVHR showed the highest values 4 das, ranging between 46 and 58 %, with similar results at 7 das (between 48 and 67 %) ($p < 0.001$; Table 3). According to Gutiérrez-Gutiérrez et al. (2022), Banderita grass exhibits a faster germination rate compared to Gigante, which represents an adaptive advantage in arid and semi-arid areas, as early radicle development allows for more efficient use of the limited and temporary water availability. The results obtained agree with those reported by Ramírez-Segura et al. (2022), who found that Banderita species have a higher germination percentage (up to 90 %) in a shorter time compared to Tempranero (20 %) and Gigante (77 %). Hernández-Guzmán et al. (2021) evaluated the effect of caryopsis size on the germination of Banderita and Navajita, observing that larger caryopses reached higher germination rates (98 and 87 %, respectively) than smaller caryopses (63 and 37 %, respectively).

The ecotypes TTES and TSAT showed the lowest germination rates 4 days after sowing (0 and 2 %, respectively) (Table 3). This is consistent with the findings of Ramírez-Segura et al. (2022), who reported that Tempranero grass remained below 10 %

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 lobo, valor muy por debajo de lo observado en el presente estudio.

En cuanto a la morfología de la cariósida, el ecotipo TTES fue el más ancho (1132 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 2510 y 2621 μm), en contraste con los ecotipos TTES y TSAT de la especie tempranero, los cuales presentaron las cariósidas más cortas (entre 1355 y 1396 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 lobo 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

Table 3. Comparison of mean germination percentages 4 and 7 days after sowing (das) of 14 native grass ecotypes collected in 2024 in the Tamaulipas Highlands, Mexico.
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.

Common name / Nombre común	Ecotype / Ecotipo	Germination (%) / Germinación (%)	
		4 das / 4 dds	7 das / 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
p-value / Valor de p		<0.0001	<0.0001

Mean ± standard error. Different letters in each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).
Promedio ± error estándar. Letras diferentes dentro de cada columna indican diferencia significativa (Tukey, $p \leq 0.05$).

germination during a 10-day evaluation period. This behavior is attributed to the species' characteristic dormancy, which prevents it from reaching 100 % germination even under optimal conditions (Osuna et al., 2015; Pausas & Lamont, 2022).

The ecotypes GEST, LECP, LLPT, LVHR, NLMR, TTES, and TSAT exhibited the lowest germination rates, ranging from 4 to 17 %, 7 days after sowing (Table 3). López-Velázquez et al. (2023) reported a germination rate of 20 % for Lobero caryopses, while Gigante and Navajita reached 65 and 62 %, respectively. Germination is influenced by various intrinsic factors, including the seed's energy reserves (López-Velázquez et al., 2023; Quero-Carrillo et al., 2016), hormonal control, and gene expression related to the process (Miransari & Smith, 2014). Furthermore, soil conditions play a crucial role in nutrient uptake necessary for seed development and are particularly important during the early days after sowing, when initial root growth determines the seedling's ability to absorb water (Hernández-Guzmán et al., 2015).

High viability, rapid germination, and strong establishment provide an adaptive advantage by enabling proper seedling development and the formation of well-established crowns capable of producing vegetative

germinación mayores (98 y 87 %, respectivamente) que las cariósides chicas (63 y 37 %, respectivamente).

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 tempranero 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

and reproductive stems in a shorter time (Hernández-Guzmán et al., 2021). However, removing accessory bracts is not recommended when the goal is to store the material, as these structures serve as protective barriers against environmental fluctuations and help maintain the viability of caryopses. In this regard, Velázquez et al. (2015) reported germination rates of up to 97 % in non-scarified seeds stored for 16 months.

Pearson correlation and hierarchical clustering

The correlation analysis revealed significant relationships ($p < 0.05$) between the physical and physiological traits of the evaluated ecotypes (Figure 2). A strong positive correlation was observed between 1000 caryopses weight (WTC) and caryopsis width (CW) ($r = 0.93$), suggesting that seed width directly influences seed mass, likely related to the amount of stored carbohydrates (Márquez-Godoy et al., 2025). In contrast, WTC showed a negative correlation with the number of caryopses per kilogram (NC) ($r = -0.89$), which is physiologically consistent, as larger and heavier individual seeds correspond to fewer seeds per unit weight (Hernández-Guzmán et al., 2021; Márquez-Godoy et al., 2025). Similarly, a negative correlation was found between CW and NC ($r = -0.89$), while a positive correlation existed between germination rate and caryopsis length (CL) ($r = 0.68$), indicating a trend where ecotypes with longer seeds tend to exhibit higher germination capacity.

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 las 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

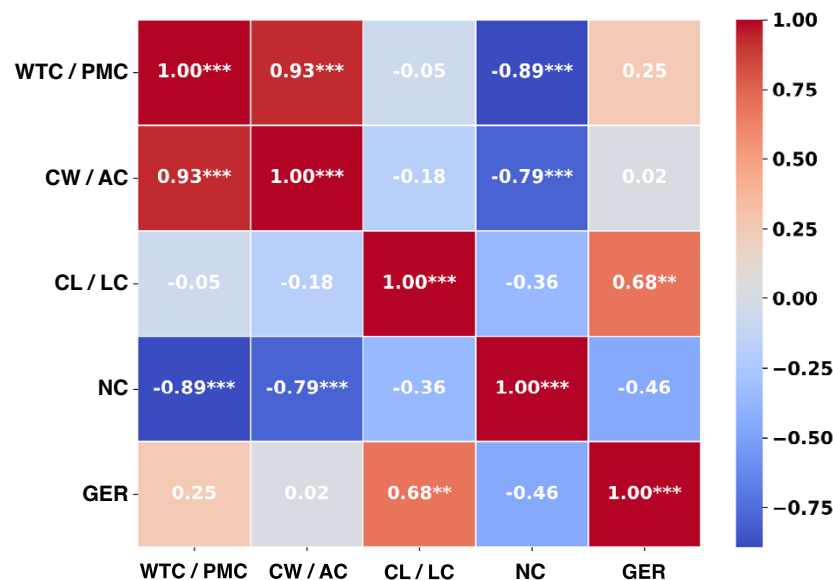


Figure 2. Pearson correlation among physical and physiological variables of 14 native grass ecotypes collected in 2024 in the Tamaulipas Highlands, Mexico. WTC: weight of 1000 caryopses; CW: caryopsis width; CL: caryopsis length; NC: number of caryopses per kilogram; GER: germination.

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

The hierarchical clustering analysis identified five phenotypically distinct groups among the evaluated ecotypes (Figure 3). Each group exhibited unique patterns in both morphological and physiological variables, reflecting significant structural diversity within the genetic material studied. Group 1 included ecotypes from the *Bouteloua* complex (BECP, BALT, NLMR, and NVHR), which were characterized by smaller seeds (WTC = 380 mg), a higher NC (2.69 million·kg⁻¹) (Table 2), and moderate germination rates (30 %) (Table 3). This combination of traits suggests potential for seed production programs under planned agronomic management (López-Velázquez et al., 2023). Group 2 consisted of the GEST and GECP ecotypes, which exhibited more developed morphology, with a higher WTC (530 mg) and an average germination rate of 23.5 % (Table 3). This profile may indicate stronger initial vigor and establishment capacity. However, further evaluations are needed, including assessments of vegetative growth, regrowth potential, forage traits, nutritional value, and performance under diverse environmental conditions (Márquez-Godoy et al., 2025).

Group 3, composed of BLFR, BEST, and BTOM, showed clear differentiation within the same species, indicating intraspecific variability. These ecotypes had an average WTC of 490 mg and caryopsis dimensions of 67 µm in width and 2592 µm in length (Table 2). They also recorded the highest germination rate (67 %) (Table 3). These traits suggest high potential for seed

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.

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,

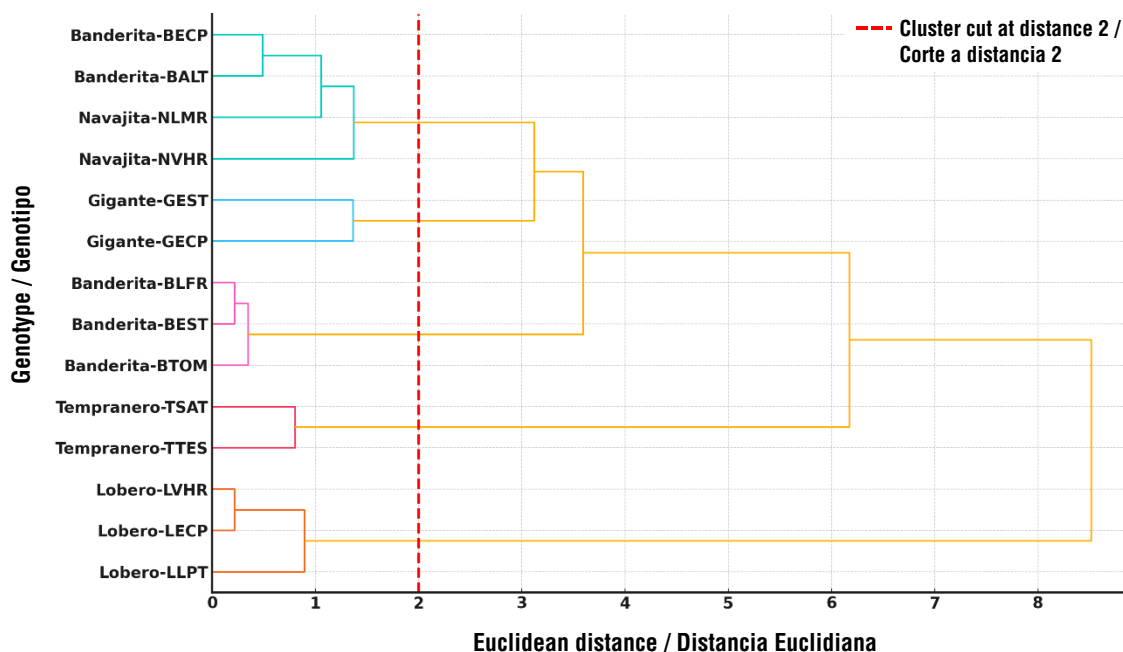


Figure 3. Hierarchical dendrogram generated using Ward's method and Euclidean distance, based on morphological and physiological traits of caryopses from 14 native grass ecotypes collected in 2024 in the Tamaulipas Highlands, Mexico
Figura 3. Dendrograma jerárquico generado con el método de Ward y distancia euclidiana, a partir de variables morfológicas y fisiológicas de cariopsis de 14 ecotipos de pastos nativos recolectados en 2024 en el Altiplano Tamaulipeco, México.

production programs, as they combine good physical and physiological quality (Hernández-Guzmán et al., 2021). Group 4, composed of TSAT and TTES, showed uniform behavior, with the widest seeds (1098 μm) and a WTC of 720 mg (Table 2), but a significantly lower germination rate (10.5 %) (Table 3). This discrepancy confirms that larger seed size does not correlate with higher viability, consistent with findings in other forage species (Hernández-Guzmán et al., 2021; López-Velázquez et al., 2023; Quero-Carrillo et al., 2017).

Finally, Group 5, composed of LVHR, LECP, and LLPT, was characterized by small and light seeds (WTC = 100 mg), with an approximate density of 9.5 million caryopses per kilogram (Table 2), and low germination (8.3 %) (Table 3). These traits can be interpreted as adaptations to ecologically restrictive environments, where the high number of seeds per unit mass functions as a compensatory propagation mechanism in response to physiological limitations (López-Velázquez et al., 2023; Márquez-Godoy et al., 2025). However, the low viability and germination limit their use in seed production programs.

Conclusions

The results highlight the diversity of native grasses from the Tamaulipas Highlands, where each ecotype showed distinct traits in seed size and physiological quality. This variability represents a valuable genetic resource and opens the possibility of selecting materials with greater potential for grassland restoration or seed production adapted to specific conditions. An important finding was that larger seed size, as observed in the TTES ecotype, is not always associated with higher germination. Overall, the results offer practical guidance for field decision-making, including the selection of ecotypes, management strategies, and realistic yield expectations.

End of English version

References / 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>

valor nutricional y su desempeño en diferentes ambientes (Márquez-Godoy et al., 2025).

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 cariósido de 67 μm de ancho y 2592 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 (1098 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 cariósidos 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.

Fin de la versión en español

- 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>
- 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
- International Seed Testing Association (ISTA). (2023). *International rules for seed testing*. ISTA. <https://www.seedtest.org/en/publications/international-rules-seed-testing.html>
- 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 Fitotecnica 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 cariósidos 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-Álvarez, 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 cariósidos 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 cariósidos. *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 Fitotecnica 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>