

Rendimiento forrajero, valor nutritivo y estabilidad aeróbica de ensilados de maíz en condiciones cálido-subhúmedas

Forage yield, nutritive value, and aerobic stability of maize silages under warm subhumid conditions

Daniela Hernández-Hernández¹ , José Felipe Orzuna-Orzuna² , Rosendo Hernández-Martínez³ , Ricardo Velasco-Carrillo¹ , Elvia Margarita Romero-Treviño¹ , Jonathan Raúl Garay-Martínez^{3*} 

¹Instituto Tecnológico de Altamira, Tecnológico Nacional de México. Carretera Tampico-Mante, km 24.5, CP. 89602. Altamira, Tamaulipas, México.

²Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Gómez Palacio - Cd. Juárez km. 40, CP. 35230. Bermejillo, Durango, México.

³Campo Experimental Las Huastecas, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Carretera Tampico-Mante km 55, CP. 89610. Altamira, Tamaulipas, México.

*Autor de correspondencia: garay.jonathan@inifap.gob.mx

Nota científica

Recibida: 10 de febrero 2026

Aceptada: 30 de julio 2026

RESUMEN. El objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento forrajero, la composición química, el valor nutritivo y la estabilidad aeróbica de ensilados de seis híbridos de maíz bajo condiciones cálido-subhúmedas. Se evaluaron los híbridos H-443A, DK-357, DK-6018, NA975, NB722 y NB950 bajo riego. Se determinaron el rendimiento de materia verde total (MVT), materia seca total (MST), proteína cruda (PC), digestibilidad *in vitro* (DIVMS) y la dinámica de exposición aeróbica durante 64 h. NB722 presentó el mayor rendimiento de MVT y MST (35.1 y 10.3 t ha⁻¹, respectivamente), pero mostró baja estabilidad aeróbica (temperatura > 6 °C y pH de 5.0 a las 24 h). NA975 presentó una PC mayor (105 g kg⁻¹). DK-357, DK-6018, NA975 y NB950 presentaron los mayores valores de DIVMS, entre 684 y 696 g kg⁻¹. La selección de híbridos para ensilado debe integrar rendimiento, calidad y estabilidad aeróbica; NA975 y DK-357 mostraron el mejor equilibrio; NB722 destacó en producción; y DK-6018, en su conservación.

Palabras clave: Alimentación de rumiantes, deterioro aeróbico, conservación de forraje, *Zea mays* L.

ABSTRACT. The objective of this study was to evaluate forage yield, chemical composition, nutritive value, and aerobic stability of silages from six maize hybrids under warm subhumid conditions. Hybrids H-443A, DK-357, DK-6018, NA975, NB722, and NB950 were evaluated under irrigation. Total green matter yield (TGM), total dry matter yield (TDM), crude protein (CP), *in vitro* dry matter digestibility (IVDMD), and aerobic exposure dynamics during 64 h were determined. Hybrid NB722 showed the highest TGM and TDM yields (35.1 and 10.3 t ha⁻¹, respectively) but exhibited low aerobic stability (temperature >6 °C and pH of 5.0 at 24 h). Hybrid NA975 presented higher CP content (105 g kg⁻¹). DK-357, DK-6018, NA975 and NB950 presented the highest IVDMD values, between 684 and 696 g kg⁻¹. The selection of maize hybrids for silage should integrate yield, quality, and aerobic stability; NA975 and DK-357 showed the best balance, NB722 excelled in production, and DK-6018 in its conservation.

Keywords: Ruminant feeding, aerobic deterioration, forage conservation, *Zea mays* L.

Como citar: Hernández-Hernández D, Orzuna-Orzuna JF, Hernández-Martínez R, Velasco-Carrillo R, Romero-Treviño EM, Garay-Martínez JR (2026) Rendimiento forrajero, valor nutritivo y estabilidad aeróbica de ensilados de maíz en condiciones cálido-subhúmedas. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 13(3): e5069. DOI: 10.19136/era.a13n3.5069.

INTRODUCCIÓN

En las regiones tropicales y subtropicales, la alimentación de los rumiantes depende de la disponibilidad y la calidad de los forrajes, que constituyen la base de su dieta. En estas regiones, la producción de forrajes se caracteriza por una marcada estacionalidad: alta disponibilidad de biomasa durante la época de lluvias y escasez durante la estación seca, lo que provoca una disminución de los parámetros productivos en las unidades de producción (Garay-Martínez *et al.* 2024). Ante este escenario, la conservación de forrajes mediante el ensilado es una estrategia que garantiza un suministro constante de alimento a lo largo del año (Dunière *et al.* 2013, Garay-Martínez *et al.* 2025). Los cultivos que combinan una alta capacidad de producción y características apropiadas para la fermentación resultan fundamentales para sostener la productividad ganadera en zonas donde las lluvias son estacionales. El maíz (*Zea mays* L.) es la opción más utilizada a nivel mundial para la elaboración de ensilados debido al rendimiento elevado de materia seca (MS), con valores que oscilan entre 9.4 y 34.2 t ha⁻¹ (Robles-Jiménez *et al.* 2021, Lucio-Ruiz *et al.* 2023) y el contenido de carbohidratos solubles (50 g kg⁻¹ de MS), que favorecen la fermentación láctica y la reducción rápida del pH (Karnatam *et al.* 2023). Además, presenta una elevada concentración de almidón, con valores de 152 g kg⁻¹ de MS y alta digestibilidad de la materia seca (635 g kg⁻¹; Robles-Jiménez *et al.* 2021, Mancipe-Muñoz *et al.* 2022). Gracias a este conjunto de características, el maíz constituye la base de los sistemas intensivos de producción de carne y leche en ambientes tropicales y subtropicales (Robles-Jiménez *et al.* 2021).

La calidad del ensilado se puede definir por el contenido de proteína cruda, digestibilidad de la materia seca, valor relativo del forraje y las concentraciones de fibras detergente neutra y detergente ácida. Estos parámetros determinan la eficiencia con la que el alimento es aprovechado por los animales, ya que valores altos de fibra estructural suelen asociarse con una mayor lignificación, una menor degradabilidad y un menor consumo voluntario (Ferreira *et al.* 2023, Stypinski *et al.* 2024). Asimismo, una vez abierto el silo, la estabilidad aeróbica se convierte en un factor determinante, ya que la entrada de oxígeno favorece el crecimiento de microorganismos saprófitos, lo que provoca incrementos en la temperatura y el pH del ensilado, acelerando el deterioro y disminuyendo el tiempo de utilización de manera segura y eficiente (Tabacco *et al.* 2011, Yin *et al.* 2024).

Las diferencias genéticas entre los maíces se reflejan no solo en la cantidad de biomasa que producen y en su composición química, sino también en la capacidad de sus ensilados para mantenerse estables una vez expuestos al aire. En este sentido, se han documentado diferencias en la calidad de los ensilados entre materiales híbridos comerciales y nativos (Alvarado-Ramírez *et al.* 2023); por lo cual es importante seleccionar genotipos adaptados tanto a las condiciones ambientales como a los fines productivos de cada sistema de producción (Rodríguez-Ortega *et al.* 2024). En las regiones tropicales y cálido-subhúmedas, existe la necesidad de generar información sobre la producción de forrajes para su conservación e identificar materiales que combinen altos volúmenes de biomasa, alto valor nutritivo y estabilidad aeróbica del ensilado; no siempre resulta sencillo definir cuál de estos atributos debe tener mayor peso en la selección; por ello, resulta conveniente utilizar herramientas de análisis multivariado, como el análisis de componentes principales (ACP), que permitan valorar conjuntamente las distintas variables y realizar una

elección más integral de los materiales (Jolliffe y Cadima 2016, Garay-Martínez *et al.* 2025). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el rendimiento de forraje y, en el ensilado, la composición química, el valor nutritivo y la estabilidad aeróbica de seis híbridos de maíz forrajero en condiciones cálido-subhúmedas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La investigación se llevó a cabo entre septiembre y diciembre de 2024, bajo condiciones de riego por goteo, en el Sitio Experimental Aldama, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Este sitio se localiza a una altitud de 98 metros sobre el nivel del mar, en las coordenadas 22° 51' 47.38" Norte y 98° 14' 14.20" Oeste. El clima predominante en la región es cálido subhúmedo con lluvias durante el verano (Aw_0), con temperatura media anual de 23.4 °C y precipitación promedio de 657 mm. La información sobre el régimen de riego, las precipitaciones y las temperaturas mínimas y máximas registradas durante el ensayo se presenta en la Figura 1.

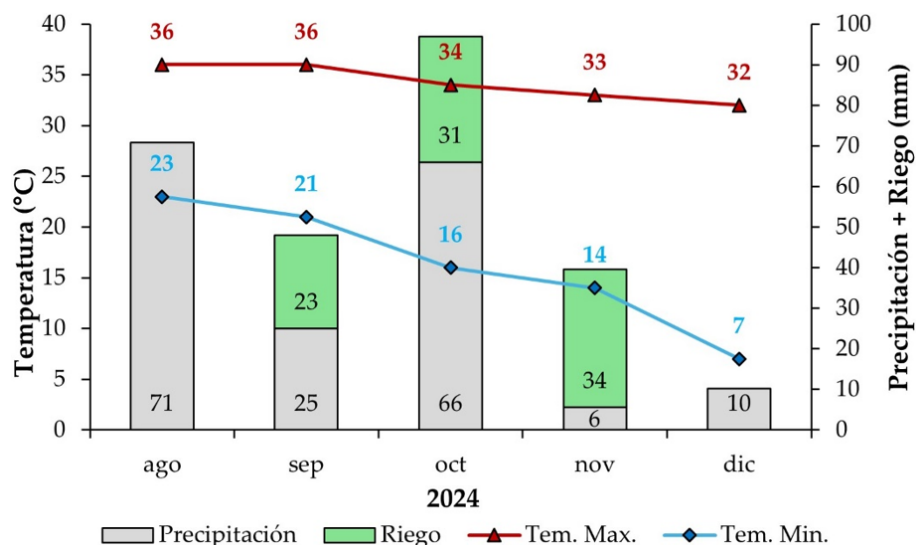


Figura 1. Riego, precipitación y temperatura máxima (Tem. Max.) y mínima (Tem. Min.) que se presentaron durante el estudio en el Sitio Experimental Aldama-INIFAP.

Material vegetal y manejo agronómico

Se evaluaron seis híbridos de maíz forrajero: dos de la marca DEKALB® (DK-6018 y DK-357), tres de la empresa NOVASEM® (NA975, NB722 y NB950) y el híbrido H-443A del INIFAP, que se utilizó como testigo. Cada unidad experimental consistió en seis surcos de 10 m de largo, separados entre hileras por 0.8 m, con una densidad de siembra de 125,000 plantas ha⁻¹ (equivalente a 10 plantas por metro lineal). La preparación del terreno incluyó labores mecánicas: un barbecho, dos pasos cruzados de rastra y un surcado final. Durante el ciclo del cultivo se aplicaron cuatro riegos (Figura 1): 23 mm el 17 de septiembre, 31 mm el 3 de octubre, 15 mm el 1 de noviembre y 19 mm el 21 de

noviembre, utilizando cinta de riego por goteo Aqua Traxx Toro® de 5/8" con goteros espaciados a 20 cm. La fertilización se llevó a cabo en dos momentos: a los 16 y 45 días después de la siembra (DDS), aplicando 60-40-00 y, posteriormente, 40-20-00 kg ha⁻¹ de N-P-K. Para el manejo del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), se utilizó clorantraniliprol al 18.4% (100 mL ha⁻¹) en las mismas fechas.

Muestreo y variables de estudio

La cosecha del forraje se efectuó a los 83 DDS, momento en que los híbridos presentaron grano lechoso-masoso. Se midió la altura de planta (AP; cm) y se recolectó el forraje verde en cuatro metros lineales, cortándolo a 20 cm del nivel del suelo. A partir de esta muestra, se separaron tres plantas y se fraccionaron en sus componentes morfológicos: hoja (vaina y lámina foliar), tallo, mazorca (grano, olote y brácteas), panícula y tejido muerto (láminas con más del 50% de clorosis).

Con estos datos se estimó el rendimiento (t ha⁻¹) de materia verde total (MVT). Posteriormente, todos los componentes se secaron en estufa con circulación de aire forzado a 65 °C durante 72 horas, tras lo cual se determinó el rendimiento de materia seca total (MST) y de cada componente morfológico. El material vegetal remanente, recolectado tras estimar el rendimiento, fue destinado a la elaboración de ensilados experimentales.

Para ello, el forraje se picó hasta obtener partículas con una longitud promedio de 2.0 ± 0.5 cm. Posteriormente, se introdujo en silos fabricados con tubos de policloruro de vinilo (PVC) de 6 pulgadas de diámetro por 46 cm de largo, cerrados en un extremo. El material se compactó y luego se selló herméticamente con plástico de polietileno, asegurado con cinta para ductos. La densidad alcanzada en los silos fue de 720 ± 15 kg m⁻³. Los ensilados se almacenaron durante 150 días, tras lo cual se procedió a su apertura y muestreo para los análisis correspondientes. Se cuantificó la proteína cruda (g kg⁻¹), de acuerdo con el método de la AOAC (2019). Las fracciones de fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA) se analizaron conforme al procedimiento de Van Soest *et al.* (1991), adaptado al equipo Ankom 200 Fiber Analyzer (Ankom Technology, Fairport NY). A partir de estos datos, se calculó el contenido de hemicelulosa mediante la diferencia aritmética (HEM = FDN – FDA).

La digestibilidad in vitro de la materia seca se evaluó mediante la técnica propuesta por Tilley y Terry (1963), empleando un equipo Ankom Daisy II. Para estimar el consumo potencial del forraje se utilizó la fórmula de Mertens (1987): Consumo (%) = 120 / FDN (%). Posteriormente, se calculó el valor relativo del forraje (VRF) mediante la siguiente expresión (Undersander *et al.* 2002):

$$VRF = \frac{\text{Consumo} \times \text{Digestibilidad}}{1.29}$$

La estabilidad aeróbica se evaluó según el protocolo modificado de Ashbell *et al.* (1991). En esta etapa, se colocaron 2.5 kg de ensilado en recipientes de poliestireno expandido (capacidad de 4 L), cubiertos en la parte superior con toallas de papel (Sanitas®) para reducir la pérdida de humedad. Los ensilados se mantuvieron en una sala con temperatura controlada (~26 °C). La temperatura se midió en el centro del material cada ocho horas durante 64 h con un termómetro digital (Taylor®, modelo 9878E). En cada punto de lectura se tomaron muestras para determinar el pH mediante el método descrito por Lucio-Ruiz *et al.* (2023). La estabilidad aeróbica se definió como el tiempo

transcurrido hasta que la temperatura del ensilado superó en 2 °C la temperatura ambiental, una vez expuesto al oxígeno (Aniceto *et al.* 2024).

Análisis estadístico

Las variables se analizaron mediante el procedimiento GLM de SAS, considerando un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). La dinámica de temperatura y pH se representó mediante líneas suavizadas e intervalos de confianza del 95% (Virtanen *et al.* 2020). Las figuras fueron generadas en Python 3.11 con el uso de las bibliotecas pandas, numpy, matplotlib y scipy (Hunter 2007). El análisis de componentes principales (ACP) se realizó sobre datos estandarizados con scikit-learn, lo que explicó el 72.5% de la variación en los dos primeros componentes (Jolliffe y Cadima 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de forraje

Se identificaron diferencias significativas en la AP entre los híbridos de maíz ($p = 0.0003$). Entre ellos, DK-357, H-443A y NA975 alcanzaron las mayores alturas, con un promedio cercano a 205 cm, mientras que NB950 presentó la menor AP, de 182 cm (Tabla 1). En cuanto al rendimiento de MVT, el híbrido NB722 fue el más productivo ($p < 0.0001$; 35.1 t ha⁻¹), seguido por H-443A y NA975, que, en promedio, alcanzaron 29.8 t ha⁻¹. Los genotipos NB722 y NA975 registraron el mayor rendimiento de MST y H-443A presentó un valor aproximadamente 12% inferior al promedio de ambos híbridos.

Tabla 1. Altura de planta y rendimiento de forraje y por componente morfológico en híbridos de maíz en condiciones cálido-subhúmedas.

Híbrido	AP		MVT		MST		Hoja		Tallo		Maz		Pan		MM
	cm								t ha ⁻¹						
H-443A	201	ab	30.5	b	8.7	bc	2.5	ab	1.7	b	3.9	ab	0.3	a	0.3
DK-6018	192	bc	27.9	bc	8.2	c	2.4	abc	1.9	b	3.3	bc	0.2	c	0.4
DK-357	214	a	28.7	bc	8.3	c	2.3	bc	2.6	a	2.7	cd	0.2	cd	0.5
NA975	200	ab	29.1	b	9.4	ab	2.4	abc	1.9	b	4.5	a	0.1	d	0.4
NB722	195	bc	35.1	a	10.3	a	2.7	a	2.9	a	4.1	ab	0.2	b	0.5
NB950	182	c	25.7	c	7.0	d	2.2	c	2.1	b	2.2	d	0.2	cd	0.4
Valor P	0.0003		<0.0001		<0.0001		0.0011		<0.0001		<0.0001		<0.0001		0.4043

AP: altura de planta; MVT: materia verde total; MST: materia seca total; Maz: mazorca; Pan: panícula; MM: materia muerta. Literales diferentes dentro de la columna (a, b, c, d), indican diferencia estadística significativa (Tukey; $\alpha = 0.05$).

Estos resultados indican que la AP estuvo asociada con una mayor producción de biomasa en algunos híbridos, lo cual coincide con reportes que identifican a la AP como un atributo importante del rendimiento forrajero en maíz (Yang *et al.* 2025). Sin embargo, lo observado en NB722 indicó que la eficiencia de producción no depende solamente de la AP, ya que, aun con un valor

intermedio, alcanzó el mayor rendimiento de MVT y MST, lo que sugiere una mayor capacidad de acumulación de biomasa (Facco *et al.* 2024). En contraste, H-443A presentó una AP comparable a la de los híbridos más altos, pero con menor rendimiento de MST, lo que podría relacionarse con una mayor proporción de tejido acuoso o una menor eficiencia en la acumulación de materia seca (Vanhevel *et al.* 2024). En conjunto, estos resultados evidencian la importancia de evaluar múltiples atributos de rendimiento, además de la AP, para seleccionar híbridos de maíz con mayor potencial productivo en condiciones cálido-subhúmedas.

Valor nutritivo de ensilados

Se observaron diferencias significativas en la composición nutritiva de los ensilados de maíz (Tabla 2). El contenido de PC fue mayor en NA975, superando al testigo H-443A en un 25% (105 *vs.* 84 g kg⁻¹ de MS). DK-6018 y DK-357 también presentaron valores elevados de PC (98 y 97 g kg⁻¹, respectivamente), entre 15 y 17% superiores al testigo. Las diferencias en PC podrían estar relacionadas con características genéticas de los híbridos y con diferencias en las transformaciones de los compuestos nitrogenados durante el ensilado; sin embargo, la proteólisis no fue evaluada directamente en este estudio (Liu *et al.* 2021). Además, un mayor contenido de PC se asocia con una mayor disponibilidad de aminoácidos metabolizables, lo que podría favorecer el desempeño productivo en sistemas intensivos de alimentación animal (Benchaar *et al.* 2023).

Tabla 2. Valor nutritivo de ensilados de híbridos de maíz en condiciones cálido-subhúmedas.

Híbrido	g kg ⁻¹										VRF
	PC		FDN		FDA		HEM		DIVMS		
H-443A	84	d	539	a	190	a	349	a	658	c	117 d
DK-357	97	b	515	b	172	c	342	ab	696	a	129 ab
DK-6018	98	b	549	a	194	a	354	a	684	ab	120 cd
NA975	105	a	489	c	182	b	307	c	693	a	136 a
NB722	89	c	519	b	190	a	329	b	674	bc	125 bc
NB950	90	c	512	b	167	c	344	ab	692	a	130 ab
Valor P	<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001

PC: proteína cruda; FDN: fibra detergente neutra; FDA: fibra detergente ácida; HEM: hemicelulosa; DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca; VRF: valor relativo del forraje. Literales diferentes dentro de la columna (a, b, c, d), indican diferencia estadística significativa (Tukey; $\alpha = 0.05$).

En cuanto a la FDN, DK-6018 y H-443A registraron los valores más altos (549 y 539 g kg⁻¹, respectivamente; Tabla 2), superando en más de 10% a NA975, que presentó la menor concentración (489 g kg⁻¹). De manera similar, los mayores valores de FDA se observaron en DK-6018, NB722 y H-443A (190-194 g kg⁻¹), mientras que NB950 y DK-357 registraron los valores más bajos (167-172 g kg⁻¹). Este incremento en las fracciones estructurales suele asociarse con una mayor lignificación y una menor degradabilidad de la fibra, lo que podría limitar el aporte energético del ensilado (Stypinski *et al.* 2024). En contraste, los híbridos con menor FDN, como NA975, presentaron valores más altos de DIVMS y VRF, lo que confirma la relación inversa entre la

concentración de fibra estructural y la calidad nutritiva del forraje. En el caso de la HEM, los híbridos DK-6018, H-443A, NB950 y DK-357 presentaron los mayores valores, con un promedio de 347 g kg^{-1} , mientras que NA975 registró el menor contenido (307 g kg^{-1}), con una diferencia del 13%. Para la DIVMS, los híbridos DK-357, NA975, NB950 y DK-6018 mostraron los mayores valores, que oscilaron entre 684 y 696 g kg^{-1} , mientras que H-443A presentó el menor valor (658 g kg^{-1}), equivalente a una reducción de 5%. Este comportamiento coincide con reportes que indican que los incrementos en FDA y lignina disminuyen la degradabilidad de la MS y de la FDN, lo que puede restringir el consumo voluntario del animal (Facco *et al.* 2024, Stypinski *et al.* 2024). Los valores más altos de VRF se observaron en NA975, NB950 y DK-357, entre 129 y 136, mientras que H-443A registró el valor más bajo (117, Tabla 2).

Estabilidad aeróbica y dinámica del pH

Durante la exposición aeróbica, el calentamiento de los ensilados varió entre los híbridos de maíz (Figura 2). En este sentido, NB722, DK-357 y NA975 a las 16 h superaron el umbral utilizado para definir la pérdida de estabilidad aeróbica, establecido en 2°C por encima de la temperatura ambiente, y alcanzaron incrementos máximos de 12.0 , 11.3 y 8.7°C , respectivamente. Este comportamiento indicó una menor estabilidad aeróbica y coincide con lo descrito por Tabacco *et al.* (2011), quienes señalan que, tras la exposición aeróbica del ensilado, los incrementos de la temperatura interna se asocian con la proliferación de levaduras y mohos, lo que incrementa la susceptibilidad al deterioro. En contraste, los híbridos DK-6018, H-443A y NB950 rebasaron dicho umbral hasta las 32 h, con valores máximos entre 10.5 y 11.8°C , lo que sugiere una mayor capacidad de conservación bajo exposición aeróbica. Este patrón coincide con lo reportado por Ivetić *et al.* (2024), quienes indican que las diferencias genéticas pueden influir en la velocidad de deterioro y en la respuesta frente a microorganismos aeróbicos.

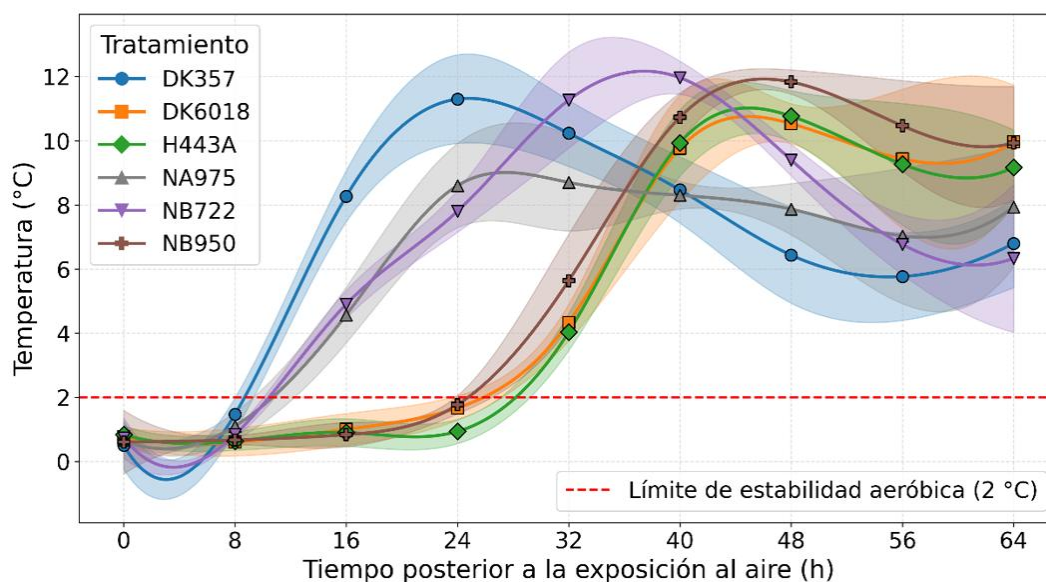


Figura 2. Evolución de la temperatura durante la exposición aeróbica de ensilados de híbridos de maíz, con bandas de confianza al 95%. Línea punteada roja que indica el umbral crítico de la estabilidad aeróbica.

Al inicio de la exposición aeróbica, todos los híbridos presentaron valores de pH cercanos a 4.0, señal de que la fermentación se desarrolló adecuadamente (Figura 3). Las diferencias aparecieron una vez que los ensilados quedaron expuestos al aire. Después de 24 h, el pH de NA975, DK-357 y NB722 ya era superior a 4.5 y posteriormente alcanzó valores de 7.0, 7.0 y 6.6, respectivamente. Este aumento indicó que dichos materiales comenzaron a deteriorarse con mayor rapidez, lo que evidenció la pérdida de la estabilidad aeróbica. En H-443A, DK-6018 y NB950 el pH se mantuvo por debajo de 4.5 hasta las 32 h (Figura 3). Este retraso, junto con el menor calentamiento registrado en estos ensilados, indica que conservaron su estabilidad durante más tiempo después de la apertura. Dunière *et al.* (2013) señalan que un pH ácido limita la actividad de microorganismos indeseables y favorece la conservación de los ácidos orgánicos en el ensilado. Estas diferencias adquieren relevancia en las regiones cálido-subhúmedas, donde el calor ambiental puede acortar la vida útil del ensilado una vez abierto. En términos prácticos, los resultados muestran que el rendimiento y la composición química no son suficientes para elegir un híbrido; también es necesario conocer cuánto tiempo puede permanecer el ensilado expuesto al aire sin que su calidad se deteriore, particularmente cuando se utiliza en sistemas intensivos de producción animal (Garay-Martínez *et al.* 2025).

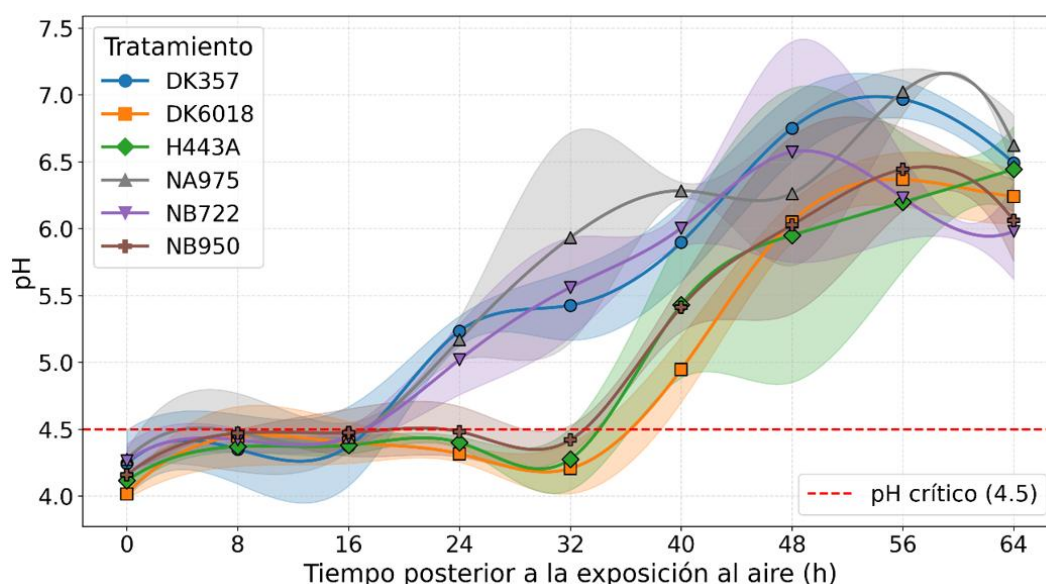


Figura 3. Evolución del pH durante la exposición aeróbica de ensilados de híbridos de maíz, con bandas de confianza al 95%. Línea roja indica el umbral crítico de estabilidad aeróbica.

Análisis de componentes principales

El ACP permitió sintetizar la variabilidad observada entre los híbridos de maíz a partir de las características productivas y nutritivas evaluadas (Figura 4). Los dos primeros componentes explicaron el 72.5% de la varianza total (PC1 = 40.8% y PC2 = 31.7%), por lo que la mayor parte de la variación observada se resumió adecuadamente en un plano bidimensional. En el biplot, NA975 y DK-357 se ubicaron próximos a los vectores de PC, DIVMS y VRF (Figura 4). Esta posición muestra que ambos híbridos estuvieron más relacionados con un mayor contenido de proteína, una mejor digestibilidad y un valor relativo del forraje más alto que los demás materiales. La

combinación de estas características se asoció con un perfil nutritivo de interés para su uso en sistemas intensivos de alimentación animal. En contraste, DK-6018 y H-443A se ubicaron en la región opuesta del biplot, próximos a los vectores de FDN, FDA y otras fracciones estructurales. Esta posición indica una mayor proporción de componentes de la pared celular, lo que ayuda a explicar la menor digestibilidad del ensilado (Ferreira *et al.* 2023). La orientación de estos vectores en sentido contrario a los relacionados con PC, DIVMS y VRF sugiere una relación inversa entre el contenido de fibra y la calidad nutritiva, tal como se ha reportado en ensilados de maíz (Alvarado-Ramírez *et al.* 2023).

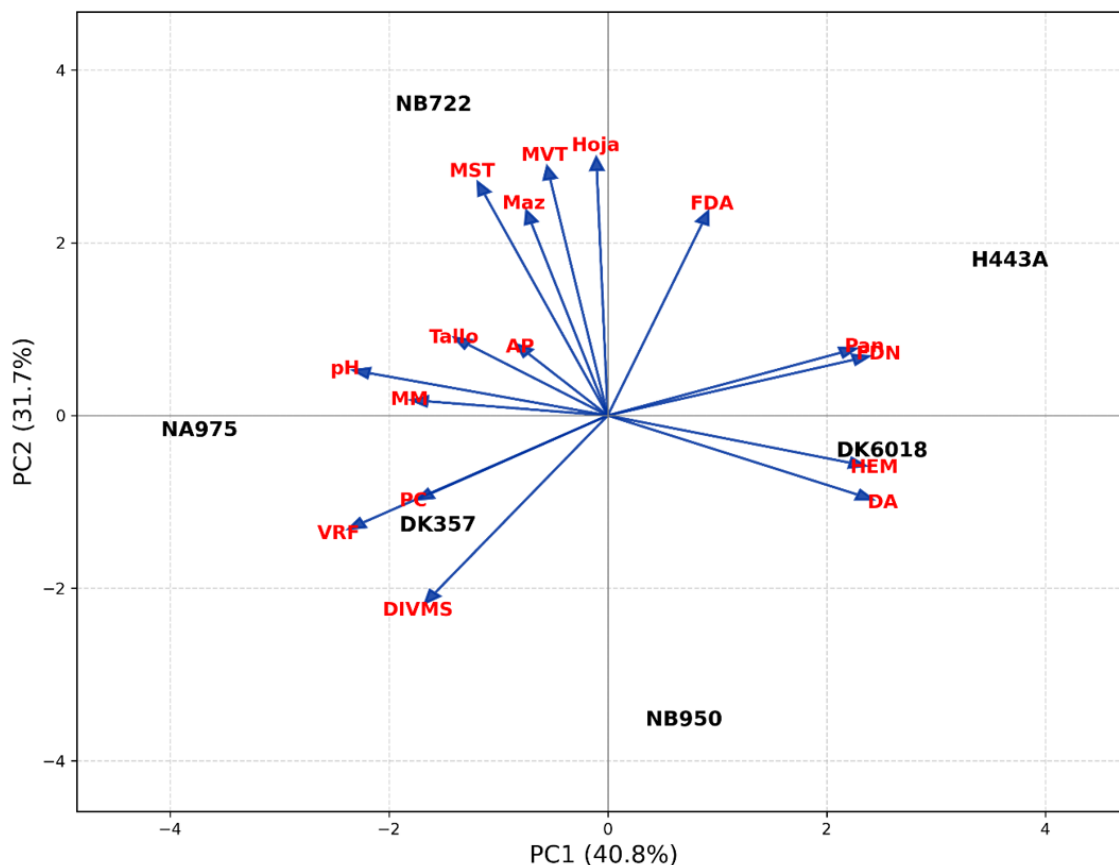


Figura 4. Biplot del análisis de componentes principales que muestra la relación entre los híbridos de maíz y sus características nutricionales, morfológicas y productivas. PC: proteína cruda; FDN: fibra detergente neutra; FDA: fibra detergente ácida; HEM: hemicelulosa; DIVMS: digestibilidad *in vitro* de la materia seca; VRF: valor relativo del forraje; DA: deterioro aeróbico; PH: pH; AP: altura de planta; MVT: materia verde total; MST: materia seca total; Maz: mazorca; Pan: panícula; MM: materia muerta.

El híbrido NB722 se ubicó cerca de las variables de rendimiento de biomasa, lo que lo identifica como un material con mayor aptitud productiva. Sin embargo, su posición más alejada respecto a los indicadores nutricionales sugiere que la mayor producción de forraje no estuvo acompañada de un aumento proporcional en su calidad; comportamiento también señalado por Robles-Jiménez *et al.* (2021) y Rodríguez-Ortega *et al.* (2024). Al analizar todas las variables en conjunto, el ACP permitió reconocer distintos patrones entre los genotipos: mientras algunos se relacionaron más con la producción de biomasa, otros se asociaron con una mejor calidad nutritiva y mayor

digestibilidad. Los híbridos NA975 y DK-357 mostraron un equilibrio favorable entre rendimiento y valor nutritivo, lo que resalta el valor práctico del ACP, que permitió observar las ventajas y limitaciones de cada material y facilitó la identificación de genotipos de maíz que podrían ser una alternativa en los sistemas de producción de rumiantes en condiciones cálido-subhúmedas (Garay-Martínez *et al.* 2025).

Los híbridos evaluados respondieron de manera distinta y ninguno reunió por sí solo todos los atributos deseables para la elaboración de ensilado. NA975 y DK-357 combinaron de manera favorable el rendimiento y valor nutritivo, aunque los ensilados perdieron estabilidad aeróbica con mayor rapidez. NB722 sobresalió por su producción de biomasa, pero también resultó susceptible al deterioro tras la apertura. Por otro lado, DK-6018, H-443A y NB950 permanecieron estables durante más tiempo; sin embargo, DK-6018 y H-443A mostraron un perfil nutritivo menos favorable. Estas diferencias muestran que elegir un híbrido únicamente por su rendimiento puede llevar a una valoración incompleta. También es necesario considerar la calidad del forraje y el tiempo durante el cual el ensilado conserva sus características una vez expuesto al aire. En este sentido, el análisis de componentes principales ayudó a integrar la información y a distinguir materiales con diferentes aptitudes productivas y nutritivas, lo que facilita su selección de acuerdo con las necesidades de los sistemas ganaderos establecidos en regiones cálido-subhúmedas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) las facilidades brindadas para la realización de los trabajos de campo en el Sitio Experimental Aldama. Asimismo, se agradece al M.C. Guillermo Guzmán Ochoa y al M.C. Jesús Emmanuel Ochoa Lechuga por el apoyo brindado durante el desarrollo de las actividades de campo y laboratorio.

DECLARACIÓN SOBRE USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Durante la preparación de este manuscrito, los autores utilizaron Grammarly para revisar y mejorar la redacción, la gramática y el estilo de los textos en español e inglés. Todas las sugerencias fueron revisadas y editadas por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por el contenido final.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

LITERATURA CITADA

- Alvarado-Ramírez ER, Ballesteros-Rodea G, Salem AZM, Reyes-Hernández J, Herrera-Corredor CA, Hernández-Meléndez J, Limas-Martínez AG, López-Aguirre D, Rivas-Jacobo MA (2023) The impact of genotype on chemical composition, feeding value and *in vitro* rumen degradability of fresh and ensiled forage of native maize (*Zea mays* L.) from Mexico. *Agriculture* 13(11): 2161. <https://doi.org/10.3390/agriculture13112161>
- Aniceto ES, Oliveira TS, Meirelles JR, Silva IN, Mozelli-Filho EJJ, Gomes RS, Arévalo JP, Moraes AR (2024) Evaluation of essential oils and their blends on the fermentative profile, microbial count, and aerobic stability of sorghum silage. *Fermentation* 10(7): 335. <https://doi.org/10.3390/fermentation10070335>
- AOAC (2019) Official methods of analysis. 21st Edition. Association of Official Analytical Chemists. Gaithersburg, MD, USA. 3172p.
- Ashbell G, Weinberg ZG, Azrieli A, Hen Y, Horev B (1991) A simple system to study the aerobic deterioration of silages. *Canadian Agricultural Engineering* 33(4): 391-393. https://library.csbe-scga.ca/docs/journal/33/33_2_391_raw.pdf
- Benchaar C, Hassanat F, Beauchemin KA, Ouellet DR, Lapierre H, Côrtes C (2023) Effect of metabolizable protein supply on milk performance, ruminal fermentation, apparent total-tract digestibility, energy and nitrogen utilization, and enteric methane production of Ayrshire and Holstein cows. *Animals* 13(5): 832. <https://doi.org/10.3390/ani13050832>
- Dunière L, Sindou J, Chaucheyras-Durand F, Chevallier I, Thévenot-Sergentet D (2013) Silage processing and strategies to prevent persistence of undesirable microorganisms. *Animal Feed Science and Technology* 182(1-4): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2013.04.006>
- Facco FB, Heller RG, Santos V, Viégas J, Takiya CS, Gandra JR, Del-Valle TA (2024) Estimation of fiber fragility and digestibility of corn silages and cool season pastures. *Agriculture* 14(8): 1345. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081345>
- Ferreira G, Thomas SE, Teets CL, Corl BA (2023) Intrinsic and extrinsic factors affecting neutral detergent fiber (NDF) digestibility of vegetative tissues in corn for silage. *Agriculture* 13(8): 1485. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081485>
- Garay-Martínez JR, Godina-Rodríguez JE, Hernández-Rodríguez B, Maldonado-Torres A, López-Cantú DG, Joaquín-Cancino S (2024) Caracterización de unidades de producción pecuaria en Aldama, Tamaulipas, México: Productores, hato y alimentación animal. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 11 (IV): e4091. <https://doi.org/10.19136/era.a11nIV.4091>
- Garay-Martínez JR, Lucio-Ruiz F, Godina-Rodríguez JE, Ochoa-Espinoza XM, Joaquín-Cancino S, Orzuna-Orzuna JF (2025) Nutritional value and aerobic stability of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) silages supplemented with additives. *Agronomy* 15(9): 2071. <https://doi.org/10.3390/agronomy15092071>
- Hunter JD (2007) Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering* 9(3): 90-95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- Ivetić A, Stojanović B, Puvača N, Radulović S, Ćosić M, Bajagić M, Petrujkić B (2024) The influence of the homofermentative lactic acid bacteria and enzymes on the nutritional value, health safety, and aerobic deterioration of the different maize hybrid silages. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society* 75(3): 7871-7886. <https://doi.org/10.12681/jhvms.35678>
- Jolliffe IT, Cadima J (2016) Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 374(2065): 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Karnatam KS, Mythri B, Un Nisa W, Sharma H, Meena TK, Rana P, Vikal Y, Gowda M, Dhillon VS, Sandhu S (2023) Silage maize as a potent candidate for sustainable animal husbandry development-

- Perspectives and strategies for genetic enhancement. *Frontiers in Genetics* 14: 1150132. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1150132>
- Liu Y, Wang G, Wu H, Meng Q, Khan MZ, Zhou Z (2021) Effect of hybrid type on fermentation and nutritional parameters of whole plant corn silage. *Animals* 11(6): 1587. <https://doi.org/10.3390/ani11061587>
- Lucio-Ruiz F, Joaquín-Cancino S, Godina-Rodríguez JE, Garay-Martínez JR (2023) Yield and chemical composition of forage and silage of native maize under irrigated semi-arid conditions. *Agrociencia* 57(4): 722-732. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v57i4.2918>
- Mancipe-Muñoz EA, Castillo-Sierra J, Vargas-Martínez JJ, Avellaneda-Avellaneda Y (2022) Compositional quality of the silage of three cultivars of corn (*Zea mays*) from the Colombian high tropics. *Agronomía Mesoamericana* 33(2): 46412. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.46412>
- Mertens DR (1987) Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. *Journal of Animal Science* 64(5): 1548-1558. <https://doi.org/10.2527/jas1987.6451548x>
- Robles-Jiménez LE, Rosas-Dávila M, Osorio-Avalos J, Chay-Canul AJ, Palacios-Riocerezo C, Castelan OOA, Gonzalez-Ronquillo M (2021) Evaluation of mexican native and hybrid maize (*Zea mays*) silages for sustainable milk production. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24(3): 124. <https://doi.org/10.56369/tsaes.3782>
- Rodríguez-Ortega LT, Landa-Salgado P, Velázquez-Martínez M, Hernández-Martínez R, Mendoza-Pedroza SI, Hernández-Guzmán FJ, Hernández-Reséndiz EJ (2024) Rendimiento de forraje, grano y calidad de ensilado de maíces híbridos en el Valle de Tulancingo. *Revista Fitotecnia Mexicana* 47(4): 349-363. <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.4.349>
- Stypinski JD, Weiss WP, Carroll AL, Kononoff PJ (2024) Effect of acid detergent lignin concentration for diets formulated to be similar in neutral detergent fiber content on energy utilization in lactating Jersey cows. *Journal of Dairy Science* 107(8): 5699-5708. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-24318>
- Tabacco E, Righi F, Quarantelli A, Borreani G (2011) Dry matter and nutritional losses during aerobic deterioration of corn and sorghum silages as influenced by different lactic acid bacteria inocula. *Journal of Dairy Science* 94(3): 1409-1419. <https://doi.org/10.3168/jds.2010-3538>
- Tilley JMA, Terry RA (1963) A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *Grass and Forage Science* 18(2): 104-111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1963.tb00335.x>
- Undersander D, Moore JE, Schneider N (2002) Relative forage quality. *Focus on Forage* 4(1): 1-2.
- Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA (1991) Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science* 74(10): 3583-3597. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)
- Vanhevel Y, De Moor A, Muylle H, Vanholme R, Boerjan W (2024) Breeding for improved digestibility and processing of lignocellulosic biomass in *Zea mays*. *Frontiers in Plant Science* 15: 1419796. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1419796>
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, Burovski E, Peterson P, Weckesser W, Bright J, van-der-Walt SJ, Brett M, *et al.* (2020) SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods* 17(3): 261-272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Yang Y, Mao S, Li S, Long Y, He C, Xia Q, Jin R, Wang P, Fu P, Pu Q (2025) Comprehensive evaluation of biological fresh weight yield-related characteristics of silage maize (*Zea mays*) at maturity stage. *BioResources* 20(3): 7034-7047. <https://doi.org/10.15376/biores.20.3.7034-7047>
- Yin H, Zhao M, Yang R, Sun J, Yu Z, Bai Ch, Xue Y (2024) Effect of regulation of whole-plant corn silage inoculated with *Lactobacillus buchneri* or *Bacillus licheniformis* on the dynamics of bacterial and fungal communities and aerobic stability. *Plants* 13(11): 1471. <https://doi.org/10.3390/plants13111471>