



Cinética de degradación del ensilaje de maíz con diferente compactación y tiempo de almacenamiento*

Degradation kinetics in corn silage under different packing densities and storage times

Christian Humberto Casillas-Gómez¹, Darwin Heredia-Nava¹, Ernesto Morales-Almaráz²,
Humberto Ramírez-Vega¹, Víctor Manuel Gómez-Rodríguez¹, Raquel Martínez-Loperena¹

- * Recepción: 19 de diciembre, 2025. Aceptación: 23 de marzo, 2026. Este trabajo formó parte de la tesis de posgrado titulada *Evaluación de la calidad del ensilado de maíz bajo diferente densidad de compactación y tiempos de apertura en microsilos*, desarrollada por el primer autor.
- ¹ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de los Altos, Departamento de Ciencias Pecuarias y Agrícolas. Tapatitlán de Morelos, México. christian.casillas7733@alumnos.udg.mx (<https://orcid.org/0000-0002-6141-3277>); darwin.heredia@cualtos.udg.mx (<https://orcid.org/0000-0002-1328-4263>); humberto.rvega@academicos.udg.mx (<https://orcid.org/0000-0002-5935-4618>); victorm.gomezr@academicos.udg.mx (<https://orcid.org/0000-0003-2551-6938>); raquel.martinez@cualtos.udg.mx (<https://orcid.org/0000-0003-2447-9733>).
- ² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Departamento de Nutrición Animal, Campus El Cerrillo. Toluca, México. emoralesa@uaemex.mx (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-0675-2193>).

Resumen

Introducción. La compactación del forraje y el tiempo de almacenamiento son factores determinantes en la fermentación y conservación del ensilaje de maíz. **Objetivo.** Evaluar el efecto de diferentes densidades de compactación y tiempos de almacenamiento sobre la calidad nutricional, la cinética de degradación y la digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra y la materia seca del ensilaje de maíz. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en Tepatitlán, Jalisco, México, en junio de 2015. La planta de maíz se cortó a los 120 días postsiembra para elaborar minisilos, abiertos tras 30 días. Se aplicó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 5×5 . Los factores fueron la densidad de compactación (450, 600, 750, 900 y 1050 kg MS m⁻³) y el tiempo de almacenamiento (30, 60, 90, 120, 150 días). **Resultados.** El tratamiento 600 kg MS m⁻³ al día 90 presentó la mejor digestibilidad de la fibra detergente neutra (87,9 %; $p < 0,05$). En la cinética de degradación ruminal, la fracción *a* fue mayor ($p < 0,05$) en el tratamiento de 1050 kg MS m⁻³ al día 120, donde el pH fue más bajo. Por otro lado, la fracción *b* y las tasas de degradación (*ca* y *cb*) no mostraron diferencias entre tratamientos ($p > 0,05$). El aumento en la densidad de compactación mantuvo los niveles de pH óptimos durante más tiempo. No obstante, el incremento excesivo de la densidad de compactación (de 900 a 1050 kg MS m⁻³), aunado a un prolongado almacenamiento, afectó negativamente la digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra. **Conclusiones.** La densidad de compactación y el tiempo de almacenamiento influyeron en la composición química y la digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra del ensilaje de maíz; sin embargo, su efecto sobre la cinética de degradación fue inconsistente.

Palabras clave: producción de gas, digestibilidad, minisilos, forraje, densidad de compactación.



Abstract

Introduction. Forage compaction and storage time are determining factors in the fermentation and preservation of corn silage. **Objective.** To evaluate the effect of different compaction densities and storage times on the nutritional quality, degradation kinetics, and *in vitro* digestibility of neutral detergent fiber and dry matter of corn silage. **Materials and methods.** The study was conducted in Tepatitlán, Jalisco, Mexico, in June 2015. Corn plants were harvested 120 days post-planting to prepare minisilos, which were opened 30 days later. A completely randomized design with a 5×5 factorial arrangement was used, and the factors were compaction density (450, 600, 750, 900, and 1050 kg DM m⁻³) and storage time (30, 60, 90, 120, and 150 days). **Results.** The 600 kg DM m⁻³ treatment at day 90 showed the best NDF digestibility (87.9 %; $p < 0.05$). In the ruminal degradation kinetics, fraction *a* was higher ($p < 0.05$) in the treatment of 1050 kg DM m⁻³ at day 120, where the pH was lower. However, fraction *b* and the degradation rates of both fractions (*ca* and *cb*) did not show differences between treatments ($p > 0.05$). The increase in compaction density maintained optimal pH levels for longer storage times. Nevertheless, the excessive increase in compaction density (from 900 to 1050 kg DM m⁻³), combined with a prolonged storage time, negatively affected the *in vitro* digestibility of neutral detergent fiber. **Conclusions.** Compaction density and storage time affected the chemical composition and *in vitro* digestibility of neutral detergent fiber in corn silage; however, their effect on degradation kinetics was inconsistent.

Keywords: gas production, digestibility, minisilos, forage, compaction density.

Introducción

Una de las principales limitantes en la alimentación de los rumiantes es la baja calidad de los recursos forrajeros y la subsecuente inclusión de insumos externos a las explotaciones, como los concentrados, los cuales disminuyen significativamente las utilidades percibidas por los productores (Arriaga-Jordán et al., 2001). Los forrajes conservados, como el ensilaje, son una estrategia para mejorar la eficiencia alimentaria (Kung et al., 2018). Uno de los cultivos más utilizados para ensilar es el maíz (*Zea mays* L.), debido a su fácil manejo, elevada producción de biomasa por hectárea y alta concentración de energía (McDonald et al., 2013).

El ensilaje busca conservar el forraje con mínimas pérdidas nutricionales, reducir el contenido de toxinas propias de fermentaciones indeseadas y mantener la aceptabilidad por parte del ganado (Kung et al., 2018). El proceso de ensilaje se logra mediante la fermentación de carbohidratos solubles en un ambiente anaeróbico y la producción de ácidos orgánicos, principalmente ácido láctico (Jalč et al., 2010).

La compactación del cultivo cosechado es una de las etapas más importantes del ensilaje, ya que favorece la extracción del aire del silo (Kung et al., 2021). Debido a que las células de la planta continúan respirando y generando dióxido de carbono aun después de la cosecha, se produce el calentamiento del material almacenado (McAllister & Hristov, 2000). Una densidad de compactación alta permite aumentar la materia seca en un mismo volumen, lo cual mejora la eficiencia económica del uso del espacio del silo (Bravo-Quirino, 2008). Asimismo, mantiene la anaerobiosis y un buen proceso de fermentación dentro del silo, lo que reduce las pérdidas en el forraje dadas por la oxidación o fermentaciones secundarias, asociadas a la disminución en la porosidad (Lisowski et al., 2020).

La compactación influye en la densidad de la materia seca. Aunque esta variable presenta una correlación negativa con las pérdidas de materia seca, dicha relación no es particularmente fuerte. Según Borreani et al. (2018), este comportamiento podría estar asociado con la porosidad del material, la cual puede variar en función del grado de compactación. Una baja densidad de compactación puede incrementar el contenido de oxígeno residual en el silo, dificultar el establecimiento de condiciones de anaerobiosis al inicio de la fermentación y favorecer el

crecimiento de microorganismos indeseables, conduciendo a pérdidas de nutrientes (Liu et al., 2024). El valor nutritivo del ensilaje de maíz puede ser modificado por el tiempo de almacenamiento, debido a su influencia sobre la acumulación de ácido láctico y pH del ensilaje, factores que determinarán la digestibilidad del forraje y el rendimiento de los animales que lo consumen (Bal, 2006). De acuerdo con Kung et al. (2018), los mecanismos responsables de la ruptura de la fibra, el almidón y las proteínas del forraje bajo condiciones ácidas sugieren que se producen alteraciones en el perfil de la fermentación conforme progresa el tiempo de almacenamiento, lo que podría afectar directamente la digestibilidad de estos componentes.

Se requiere más investigación sobre el efecto combinado de la densidad de compactación y el tiempo de almacenamiento. Aunque se ha observado que una alta densidad de compactación del ensilaje muestra mayores tasas de recuperación de materia seca (Sucu et al., 2016), también se ha reportado una disminución del contenido de materia seca y de carbohidratos hidrosolubles después de 60 días de almacenamiento (Liu et al., 2024). Esto indica que una alta densidad de compactación no garantiza una calidad superior del ensilaje. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes densidades de compactación y tiempos de almacenamiento sobre la calidad nutricional, la cinética de degradación y la digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra y la materia seca del ensilaje de maíz.

Materiales y métodos

Sitio de experimentación y material biológico

El estudio se realizó en el municipio de Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México (20°48'59,76"N y 102°45'39,96"O), a una altitud de 1806 m s. n. m. La zona presentó una precipitación promedio anual de 902 mm y una temperatura media de 19,1 °C (Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco, 2022).

El maíz se sembró el 28 de junio de 2015 y se fertilizó con una dosis de 160-69-00 (N-P-K), dividida en dos aplicaciones: a la siembra y en la etapa V4. La cosecha se realizó con ensiladora el 26 de octubre del mismo año. Una vez obtenido el forraje, se llevó a cabo el proceso de ensilaje en condiciones de laboratorio, con un contenido de materia seca (MS) de 271 g kg⁻¹, en estado lechoso-masoso y con un tamaño de partícula de 19 mm, determinado mediante un separador de partículas especializado.

Tratamientos

Los tratamientos fueron producto de un arreglo factorial 5 × 5, cuyos factores fueron la densidad de compactación (DC; 450, 600, 750, 900 y 1050 kg MS m⁻³) y el tiempo de almacenamiento (TA; 30, 60, 90, 120, 150 días) de los minisilos. Su interacción se representa en este estudio como 450-30, correspondiente a una densidad de 450 kg MS m⁻³ y 30 días de apertura.

Se elaboraron un total de 75 minisilos (derivados de 25 tratamientos por triplicado) en tubos PVC hidráulicos de 30 cm de largo y 7,62 cm de diámetro, con un volumen interno de 1397 cm³ y provistos de una válvula antirretorno. Para llenarlos, se utilizó una prensa hidráulica. Las densidades de compactación se simulaban en función del volumen interno de los minisilos y el peso de la biomasa ensilada, conforme a la ecuación 1:

$$D = m / V \quad (1)$$

Donde:

D = Densidad de compactación (kg MS m⁻³).

m = Peso de la biomasa por ensilar (kg).

V = Volumen interno del minisilo (m^3).

Los minisilos se sellaron con silicón, sin utilizar bomba de vacío, y se conservaron a temperatura ambiente hasta cumplir los tiempos de almacenamiento establecidos. Transcurrido el periodo correspondiente, los minisilos se abrieron y se tomó una muestra para el análisis en laboratorio.

Calidad nutricional

El pH se determinó al momento de destapar los minisilos. Para ello, se tomó una muestra de 20 g de ensilaje, se añadió 180 mL de agua bidestilada y se licuó la mezcla durante 30 s a alta velocidad. Posteriormente, se filtró a través de papel con porosidad de grado 54 y el pH se midió con un potenciómetro (Cherney et al., 2004).

El contenido de MS se determinó por medio del secado de la muestra en una estufa de aire forzado a 60 °C durante 48 h (Horwitz & Latimer, 2006). Una vez seca, la muestra se molió en un molino tipo Wiley con una malla de 1 mm. El extracto etéreo (EE) se analizó mediante el método Soxhlet (Horwitz & Latimer, 2006), mientras que la fibra detergente neutra (FDN) y la fibra detergente ácida (FDA) con un analizador, conforme a lo descrito por Van Soest et al. (1991).

El contenido de proteína cruda (PC) se cuantificó con el método Dumas, y el almidón por polarimetría. La energía neta de lactación (ENL) se calculó a través del programa Milk 2006 de la Universidad de Wisconsin Madison, a partir de los parámetros de calidad nutricional analizados por química húmeda y ajustado a la ecuación 2 (National Research Council, 2001).

$$ENL = 0,0245 \cdot \% TND - 0,12 \quad (2)$$

Donde:

TND = Total de nutrientes digestibles.

Cinética de degradación

La cinética de degradación ruminal se determinó mediante la técnica de producción de gas *in vitro* de Menke y Steingass (1988), con modificaciones de Mauricio et al. (1999). El líquido ruminal se filtró utilizando tela manta de cielo, se mantuvo a 39 °C en un termo y se gasificó con CO_2 en el laboratorio para conservar condiciones anaeróbicas. Se realizaron tres tandas de incubación. Los tratamientos fueron incubados ($0,99 \pm 0,01$ g) por cuadruplicado en botellas de vidrio (120 mL). Se adicionaron 90 mL de solución amortiguadora (tampón, macrominerales, microminerales, reductora y resazurina) y 10 mL de líquido ruminal. En cada corrida de incubación se incluyeron blancos.

La producción de gas se registró cada hora durante las primeras 8 h y posteriormente se evaluó a las 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64, 68 y 72 h de incubación. El volumen acumulado se ajustó a un modelo matemático para la curva de producción de gas descrito por Jessop y Herrero (1996), mediante el programa Grafit v3 y la ecuación 3.

$$PG = a \times (1 - \exp^{-ca + t}) + b \times (1 - \exp^{-cb \times (t - \text{Lag})}) \times (t > \text{Lag}) \times -1 \quad (3)$$

Donde:

PG = Producción acumulada de gas ($mL \text{ g MS}^{-1}$).

a = Producción de gas a las 4 h de fermentación (mL).

b = Producción potencial de gas (mL).

ca = Tasa de fermentación de la fracción a .

cb = Tasa de fermentación de la fracción b .

t = Tiempo (h).

Lag = Tiempo transcurrido antes de iniciar la degradación de la fracción b .

Digestibilidad *in vitro* de la materia seca y la fibra detergente neutra

La digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) y de la fibra detergente neutra (DIVFDN) se determinó a partir de los residuos de la producción de gas *in vitro*, según Pell y Schofield (1993). Transcurridas las 72 h de incubación, la DIVMS se calculó filtrando el sustrato final de cada botella, secado en estufa (HCF-41 Riosa, México), y se estimó por diferencia de peso entre la MS inicial y la MS residual. La DIVFDN se determinó removiendo los residuos de la fermentación con solución FDN, seguido de filtración y secado. El cálculo se realizó por diferencia de peso entre el contenido inicial de FDN y el contenido de FDN residual (Pell & Schofield, 1993).

Análisis estadístico

Los datos *in vitro* por cuadruplicado (frascos de fermentación) de cada tratamiento por tanda fueron promediados; la unidad experimental fue el valor de estos datos. Las variables de respuesta (calidad nutricional, DIVMS y DIVFDN) se analizaron por medio de un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 5×5 a través del modelo de la ecuación 4. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de diferencia mínima significativa con un 95 % de confiabilidad.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad (4)$$

Donde:

μ = La media general.

A_i = Efecto del nivel del primer factor (densidad de compactación, kg m^{-3}).

B_j = Efecto del nivel del segundo factor (tiempo de almacenamiento).

AB_{ij} = Interacción entre ambos factores.

ϵ_{ijk} = Error.

Resultados

La interacción del tiempo de almacenamiento y la densidad de compactación afectó la mayoría de las variables de calidad nutricional, así como a las fracciones a y Lag de la cinética de degradación *in vitro* del ensilaje (Cuadro 1). El pH varió en función de la DC y el TA. Los minisilos con la mayor densidad ($1050 \text{ kg MS m}^{-3}$) mostraron un pH inferior a 4,0, independientemente del TA. Antes de los 60 días de apertura, el pH se mantuvo entre 3,7 y 3,9 en todas las densidades evaluadas.

El contenido de MS disminuyó ($p < 0,05$) conforme aumentó el TA del minisilo. Excepto en la densidad de 900 kg MS m^{-3} , los contenidos de materia seca siempre fueron más altos a los 30 días de apertura. De manera similar, la DIVMS disminuyó hasta el día 90 en la mayoría de las densidades de compactación. El valor más bajo se registró con una densidad de 1050 a los 120 días de apertura.

Cuadro 1. Efecto del tiempo de almacenamiento y la densidad de compactación sobre la calidad nutricional, la digestibilidad *in vitro* de la materia seca y la fibra detergente neutra de ensilaje de maíz. Tepatitlán, Jalisco, México. 2015.

Table 1. Effect of storage time and compaction density on the nutritional quality, the *in vitro* digestibility of dry matter, and the neutral detergent fiber of corn silages. Tepatitlán, Jalisco, México. 2015.

Tratamiento [†]	pH	EE	MS	ALM	DIVFDN	DIVMS	EN _L
450-30	3,84 ^{fghi}	21,7 ^{cdefgh}	302 ^{bc}	155,1 ^{bcd}	49,5 ^b	64,4 ⁱ	1,38 ^o
450-60	3,92 ^{efghi}	21,6 ^{cdefghi}	261 ^e	135,3 ^{cdefgh}	46,8 ^g	76,4 ⁱ	1,45 ⁱ
450-90	4,07 ^{def}	20,2 ⁱ	264 ^e	136,2 ^{cdefgh}	44,71 ^h	83,0 ^e	1,41 ^l
450-120	4,03 ^{cdefgh}	21,7 ^{cdefgh}	290 ^{bcd}	123,4 ^h	48,29 ^e	80,4 ^e	1,26 ^s
450-150	4,35 ^{ab}	23,1 ^{abc}	263 ^e	150,7 ^{bcd}	31,28 ^x	83,7 ^b	1,31 ^r
600-30	3,79 ^{hi}	22,0 ^{bcd}	339 ^a	167,9 ^{ab}	44,66 ⁱ	83,3 ^c	1,43 ^k
600-60	3,82 ^{ghi}	21,1 ^{fghi}	265 ^e	178,0 ^a	52,4 ^a	79,8 ^g	1,56 ^a
600-90	4,37 ^{ab}	20,6 ^{ghi}	258 ^e	157,4 ^{abc}	44,48 ^j	87,9 ^a	1,50 ^c
600-120	4,05 ^{cdefg}	21,2 ^{efghi}	269 ^{de}	138,9 ^{cdefgh}	47,06 ^f	75,4 ⁿ	1,32 ^q
600-150	4,49 ^a	23,3 ^{ab}	260 ^e	154,4 ^{bcd}	31,62 ^v	77,7 ^k	1,40 ^m
750-30	3,76 ⁱ	21,6 ^{cdefghi}	305 ^b	145,4 ^{cdefg}	43,28 ^l	76,0 ^m	1,47 ^g
750-60	3,79 ^{hi}	20,2 ⁱ	269 ^{de}	146,7 ^{cdefg}	39,02 ^r	78,7 ^j	1,46 ^h
750-90	4,44 ^{ab}	22,9 ^{abcd}	278 ^{cde}	130,3 ^{fgh}	41,66 ⁿ	79,5 ⁱ	1,47 ^f
750-120	4,29 ^{abc}	21,6 ^{cdefghi}	263 ^e	133,2 ^{efgh}	48,5 ^d	79,7 ^h	1,34 ^p
750-150	4,41 ^{ab}	24,0 ^a	260 ^e	135,8 ^{cdefgh}	39,02 ^s	79,9 ^f	1,16 ^t
900-30	3,75 ⁱ	20,5 ^{hi}	271 ^{de}	123,5 ^h	41,41 ^p	72,8 ^p	1,43 ^k
900-60	3,81 ^{hi}	20,2 ⁱ	269 ^{de}	149,5 ^{bcd}	43,28 ^k	68,5 ^r	1,44 ^j
900-90	4,08 ^{cde}	22,4 ^{bcd}	264 ^c	140,7 ^{cdefgh}	40,19 ^q	71,9 ^q	1,49 ^d
900-120	4,2 ^{bcd}	21,8 ^{cdefgh}	274 ^{de}	131,5 ^{fgh}	48,7 ^c	74,2 ^o	1,38 ⁿ
900-150	4,1 ^{cde}	22,5 ^{bcd}	271 ^{de}	124,2 ^h	35,68 ^t	33,3 ^y	1,07 ^v
1050-30	3,82 ^{ghi}	21,7 ^{cdefgh}	304 ^b	156,0 ^{bcd}	43,05 ^m	59,2 ^u	1,51 ^b
1050-60	3,8 ^{hi}	20,7 ^{ghi}	254 ^e	153,4 ^{bcd}	31,42 ^w	67,7 ^s	1,47 ^e
1050-90	3,95 ^{efghi}	22,0 ^{bcd}	272 ^{de}	126,6 ^{gh}	41,59 ^o	41,0 ^w	1,47 ^f
1050-120	3,75 ⁱ	22,6 ^{abcde}	263 ^e	140,8 ^{cdefgh}	22,94 ^y	53,2 ^v	1,26 ^s
1050-150	3,79 ^{hi}	21,8 ^{cdefgh}	270 ^{de}	127,9 ^{gh}	34,03 ^u	40,7 ^x	1,13 ^u
Valor <i>P</i>	0,0001	0,0005	0,0076	0,0417	0,0001	0,0001	0,0001
EEM	0,08	0,05	0,17	0,14	0,001	0,0002	0,0001

Letras diferentes (^{abcd}) en la misma columna representan diferencia estadística ($p < 0,05$).

[†] Tratamientos: Interacción de los factores, densidad de compactación (450, 600, 750, 900, 1050 kg MS m⁻³) y tiempo de almacenamiento (30, 60, 90, 120, 150 d). **EE:** Extracto etéreo (g kg MS⁻¹). **MS:** Materia seca (g kg MS⁻¹). **EN_L:** Energía neta de lactación (Mcal kg MS⁻¹). **ALM:** Almidón (g kg MS⁻¹). **DIVMS:** Digestibilidad *in vitro* de la MS (%). **DIVFDN:** Digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra (%). **EEM:** Error estándar de la media.

Different letters in the same column represent a statistical difference ($p < 0.05$).

[†]Treatments: Interaction of factors, packing density (450, 600, 750, 900, 1050 kg DM m⁻³), and storage time (30, 60, 90, 120, 150 days). **EE:** Ether extract (g kg DM⁻¹). **MS:** Dry matter (g kg DM⁻¹). **EN_L:** Net energy for lactation (Mcal kg DM⁻¹). **ALM:** Starch (g kg DM⁻¹). **DIVMS:** *In vitro* digestibility of dry matter (%). **DIVFDN:** *In vitro* digestibility of neutral detergent fiber (%). **EEM:** Standard error of the mean.

El tratamiento de 600-90 tuvo la mayor ($p < 0,05$) DIVFDN (87,9 %). El contenido de almidón (ALM) en el ensilaje fue mayor entre los 30 y 60 días de apertura bajo cualquier DC. El tratamiento 600-60 mostró el contenido más elevado de ALM, con alrededor de 30 % más que los tratamientos 450-120, 900-30 y 900-150.

La DC afectó significativamente ($p < 0,05$) los contenidos de FDA, FDN y PC del ensilaje. A mayor DC en el minisilo, el contenido de FDA y FDN incrementó, mientras que el contenido de PC disminuyó, siendo menor en las densidades de 600 y 1050 kg MS m⁻³, con un 0,45 % menos que el tratamiento de 900 Kg MS m⁻³, que presentó el contenido más alto (Cuadro 2).

Cuadro 2. Calidad nutricional y digestibilidad *in vitro* de ensilaje de maíz a diferentes densidades de compactación y tiempos de almacenamiento en Tepatitlán, Jalisco, México. 2015.

Table 2. Nutritional quality and *in vitro* digestibility of corn silage at different compaction densities and storage times in Tepatitlán, Jalisco, México. 2015.

Componente	Densidad de compactación (DC; kg MS m ⁻³)					Tiempo de almacenamiento (TA; días)					Valor P			
	450	600	750	900	1050	30	60	90	120	150	DC	TA	DC*TA	EEM
MS	269	264	270	268	267	267 ^{bc}	263 ^c	267 ^{bc}	272 ^a	265 ^{bc}	0,48	0,0001	0,0076	0,17
FDA	262 ^b	257 ^b	264 ^b	264 ^b	272 ^a	259	263	268	261	266	0,02	0,27	0,49	0,71
FDN	517,7 ^b	519 ^b	523 ^b	528 ^{ab}	536,7 ^a	527 ^{bc}	531 ^b	542 ^a	504 ^d	520 ^c	0,042	0,0001	0,30	1,03
EE	21,7	21,6	22,0	21,5	21,7	21,5 ^b	20,7 ^c	21,6 ^b	21,8 ^b	22,9 ^a	0,55	0,0001	0,0005	0,05
ALM	140,1 ^b	159 ^a	138 ^b	133,8 ^b	140,9 ^b	149,5 ^a	152 ^a	138 ^b	133 ^b	138 ^b	0,0001	0,0005	0,041	0,14
PC	8,81 ^{ab}	8,65 ^b	8,97 ^{ab}	9,10 ^a	8,68 ^b	8,76	8,79	8,78	8,98	8,91	0,004	0,373	0,605	0,20
EN _L	1,36 ^e	1,44 ^a	1,38 ^b	1,36 ^d	1,37 ^c	1,44 ^c	1,48 ^a	1,47 ^b	1,31 ^d	1,21 ^e	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002
pH	4,04 ^a	4,10 ^a	4,14 ^a	3,99 ^a	3,82 ^b	3,79 ^c	3,83 ^c	4,18 ^{ab}	4,06 ^b	4,22 ^a	0,0001	0,0001	0,0006	0,08
DIVMS	71,1 ^{ab}	74,2 ^a	72,7 ^a	68,6 ^{ab}	67,08 ^b	77,64 ^a	80,8 ^a	78,8 ^a	68,1 ^b	48,41 ^c	0,0001	0,0001	0,0001	0,002
DIVFDN	44,12 ^a	44,0 ^b	41,9 ^c	41,8 ^d	34,6 ^e	44,3 ^a	42,6 ^c	42,5 ^d	43,1 ^b	33,9 ^e	0,0001	0,0001	0,0001	0,001

Letras diferentes (^{abcd}) en la misma fila dentro de las columnas pertenecientes a cada uno de los factores principales representan diferencia estadística ($p < 0,05$). **MS:** Materia seca (g kg MS⁻¹). **FDA:** Fibra detergente ácido (g kg MS⁻¹). **FDN:** Fibra detergente neutra (g kg MS⁻¹). **EE:** Extracto etéreo (g kg MS⁻¹). **ALM:** Almidón (g kg MS⁻¹). **PC:** Proteína cruda (%). **EN_L:** Energía neta de lactación (Mcal kg MS⁻¹). **DIVMS:** Digestibilidad *in vitro* de la materia seca (%). **DIVFDN:** Digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra (%). **EEM:** Error estándar de la media

Different letters (^{abcd}) in the same row within the columns from each of the main factors represent a statistical difference ($p < 0,05$). **MS:** Dry matter (g kg MS⁻¹). **FDA:** Acid detergent fiber (g kg MS⁻¹). **FDN:** Neutral detergent fiber (g kg MS⁻¹). **EE:** Ether extract (g kg MS⁻¹). **ALM:** Starch (g kg MS⁻¹). **PC:** Crude protein (%). **EN_L:** Net energy for lactation (Mcal kg MS⁻¹). **DIVMS:** *In vitro* digestibility of dry matter (%). **DIVFDN:** *In vitro* digestibility of neutral detergent fiber (%). **EEM:** Standard error of the mean.

El TA no modificó la calidad nutricional del ensilaje, excepto el contenido de FDN, el cual fue menor ($p < 0,05$) a los 120 días, aunque superior al observado al día 90 (542 g), valor estadísticamente diferente a los demás tratamientos.

Respecto a la cinética de degradación, se observaron interacciones significativas en la fracción *a* y el tiempo *lag* ($p < 0,05$). La fracción *a* fue mayor (9,7 mL) en el tratamiento 1050-120, difiriendo drásticamente de los tratamientos con la misma DC en los demás días de TA, cuyos valores fueron inferiores a la unidad (Cuadro 3).

La tasa de degradación de la fracción *a* (*ca*), la fracción *b* y su tasa de degradación (*cb*) no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$) por la interacción de los factores principales. En contraste, el tiempo *lag* exhibió variaciones importantes ($p < 0,05$) entre los tratamientos. A los 30 días de apertura del minisilo, los valores fluctuaron entre 4,5 y 8,3 h (Cuadro 3). El *lag* más corto se presentó en el tratamiento 1050-150 (1,75 h; $p < 0,05$), y el más prolongado, en el tratamiento 1050-120 (8,55 h).

Cuadro 3. Cinética de degradación *in vitro* de ensilaje de maíz a diferentes tiempos de almacenamiento y densidades de compactación. Tepatitlán, Jalisco, México. 2015.

Table 3. *In vitro* degradation kinetics of corn silage at different storage times and compaction densities. Tepatitlán, Jalisco, México. 2015.

Tratamiento [†]	Cinética de degradación <i>in vitro</i>				
	<i>a</i>	<i>ca</i>	<i>b</i>	<i>cb</i>	<i>lag</i>
450-30	5,71477 ^c	0,02468	7,58255	0,02567	8,33669 ^a
450-60	2,17272 ^{egh}	0,0296	10,77054	0,031	4,61871 ^{bc}
450-90	1,0754 ^{klm}	0,15972	13,50545	0,02909	2,57293 ^e
450-120	1,19679 ^{ijklm}	0,13393	14,20109	0,02909	1,79908 ^e
450-150	2,69764 ^{def}	0,11996	14,07733	0,02706	2,63279 ^e
600-30	3,17949 ^d	0,01869	10,85337	0,02404	6,15844 ^b
600-60	2,36652 ^{efg}	0,01987	11,07452	0,02364	5,09863 ^{bc}
600-90	2,59496 ^{def}	0,12237	13,77338	0,02026	2,7502 ^{de}
600-120	7,09146 ^b	0,04652	12,21419	0,00851	8,49774 ^a
600-150	2,1879 ^{fgh}	0,15275	14,73161	0,02956	2,76064 ^{de}
750-30	1,69073 ^{hij}	0,03015	11,53685	0,03148	5,32694 ^{bc}
750-60	2,87098 ^{de}	0,03011	11,69352	0,03236	4,37935 ^{cd}
750-90	1,72089 ^{hij}	0,10468	14,66631	0,02905	2,26792 ^e
750-120	2,22852 ^{fgh}	0,14527	15,00374	0,0254	2,18292 ^e
750-150	1,79963 ^{ghi}	0,14272	14,44811	0,02965	2,19366 ^e
900-30	5,23734 ^c	0,02058	8,06712	0,02585	8,37607 ^a
900-60	1,47692 ^{ijkl}	0,05629	12,35428	0,02467	2,68195 ^e
900-90	2,38249 ^{efg}	0,13701	14,62915	0,02396	2,30898 ^e
900-120	1,37405 ^{ijklm}	0,21284	13,68966	0,03047	2,4043 ^e
900-150	1,67533 ^{hijk}	0,1643	14,93288	0,03003	2,52949 ^e
1050-30	1,50133 ^{ijkl}	0,02483	12,47825	0,0272	4,57716 ^{bc}
1050-60	1,49434 ^{ijkl}	0,10249	13,60271	0,02257	2,65677 ^e
1050-90	0,83901 ^m	0,1986	14,51283	0,02392	2,34611 ^e
1050-120	9,74886 ^a	0,04836	11,61237	0,00795	8,55021 ^a
1050-150	0,97694 ^{lm}	0,219	14,23365	0,03504	1,75663 ^e
Valor <i>P</i>	0,0001	0,3825	0,1070	0,5091	0,0001
EEM	0,0404	0,0394	0,2609	0,0011	0,1154

[†] Interacción del factor A: densidad de compactación (450, 600, 750, 900, 1050 kg MS m⁻³), y el factor B: tiempo de almacenamiento (30, 60, 90, 120, 150 d). Medias en la misma columna con diferentes letras representan diferencias estadísticas ($p < 0,05$). **a:** Fracción soluble. **ca:** Tasa de degradación de *a*. **b:** Fracción no soluble altamente degradable. **cb:** Tasa de degradación de *b*. **lag:** Tiempo para iniciar la degradación de la fracción *b*. **EEM:** Error estándar de la media.

[†] Interaction of factor A: compaction density (450, 600, 750, 900, 1050 kg DM m⁻³), and factor B: storage time (30, 60, 90, 120, 150 days). Means in the same column with different letters represent statistical differences ($p < 0.05$). **a:** Soluble fraction. **ca:** Degradation rate of *a*. **b:** Highly degradable non-soluble fraction. **cb:** Degradation rate of *b*. **lag:** Time to initiation of degradation of fraction *b*. **EEM:** Standard error of the means.

Discusión

Uno de los parámetros más comunes para evaluar la fermentación del ensilaje es el pH. En este estudio, los valores oscilaron entre 3,7 y 4,5. En el ensilaje de maíz, Bal (2006) reportó una disminución del pH (4,23; 4,08; 4,09; 3,97 y 3,93) conforme aumentó el tiempo de almacenamiento (7, 15, 28, 56 y 112 días, respectivamente), sin efectos significativos de la interacción entre el TA y el estado de madurez de la planta.

Estudios previos no reportan influencia alguna del tiempo de apertura sobre el pH (Gallo et al., 2018) ni de la densidad de compactación sobre la composición química del ensilaje de maíz (Kung et al., 2021); sin embargo, estas investigaciones emplearon densidades menores a las utilizadas en este trabajo. El pH del ensilaje de maíz se considera adecuado entre 3,7 y 4,0 (Kung et al., 2018), rango en el que se ubicaron los minisilos a los 30 y 60 días de almacenamiento en todas las densidades evaluadas.

El pH final del ensilaje depende de diversos factores, pero está más relacionado con la concentración de ácido láctico y la capacidad tampón del cultivo cosechado (Kung et al., 2018). El pH del ensilaje incrementó junto al TA, patrón que ocurrió en todas las densidades de compactación. Estos resultados difieren de lo observado por Windle et al. (2014) y Der Bedrosian et al. (2012), quienes reportaron una disminución del pH conforme avanzó el TA hasta los 150 días, y aun después de 180 días de fermentación.

La concentración y digestibilidad de la FDN son las variables más importantes respecto al valor nutritivo del forraje (Bernades et al., 2018). El incremento en los contenidos de FDN y FDA en el ensilaje por la DC también se ha documentado en ensilaje de alfalfa (Liu et al., 2024), aunque en ensilaje de cebada los efectos han sido inconsistentes (Sun et al., 2021). Esta discrepancia puede deberse a factores como la variedad del material vegetal, el método de ensilaje y las densidades utilizadas. Der Bedrosian et al. (2012) no encontraron diferencias por efecto del TA (45, 90, 180, 270 y 360 días) del minisilo sobre los contenidos de FDN y FDA en ensilaje de maíz.

La variación del contenido de proteína por influencia del TA o de la apertura del minisilo también ha sido reportada previamente. Aunque en este estudio no hubo significancia del tiempo de almacenamiento sobre el contenido de PC, otras investigaciones han descrito el incremento del contenido de PC por efecto del TA. Bal (2006), al evaluar en maíces híbridos el efecto del TA y del estado de madurez sobre la composición química del ensilaje de maíz, reportó incrementos significativos en el contenido de PC con el avance del TA, de 7,4 % a 7,8 % de la semana 1 a la 16, respectivamente. Asimismo, Der Bedrosian et al. (2012) observaron este comportamiento y lo atribuyeron a la solubilidad de la MS, a la constante degradación de proteínas por los bajos niveles de pH y la acción de enzimas bacterianas, lo que incrementó el nitrógeno amoniacal y soluble.

El efecto de la DC sobre la PC del ensilaje fue contrastante. Densidades bajas de compactación afectaron negativamente el contenido de PC en ensilaje de maíz (Kung et al., 2021; Ruppel et al., 1995). Este ensilaje empacado a una alta densidad conserva más azúcares fermentables y reduce la proteólisis en comparación con uno poco compactado (Velho et al., 2007). Sin embargo, Toruk y Koc (2009) reportaron un decremento de nitrógeno amoniacal conforme aumentó la DC. El contenido de extracto etéreo registrado en el presente estudio fue comparable al descrito por Nkosi et al. (2011), quienes documentaron valores entre 20,0 y 28,7 g kg MS⁻¹ tras 90 días de almacenamiento.

El contenido de MS fluctuó entre tratamientos. Bal (2006) encontró variaciones conforme avanzó el TA, de 397 a 386 g kg MS⁻¹ después de 16 semanas de almacenamiento, atribuidas a la acción de las enzimas de la planta y de los microorganismos aeróbicos presentes en la superficie del forraje fermentado. El procesamiento mecánico durante la cosecha y almacenamiento mejora la recuperación de MS, debido a que una mayor DC contribuye a la exclusión de oxígeno dentro del silo y reduce la porosidad del forraje, lo que evita que los microorganismos aeróbicos comprometan la calidad del ensilaje (Johnson et al., 2002). Además, las pérdidas de MS se reducen al aumentar la densidad (Ruppel et al., 1995; Sucu et al., 2016).

La energía neta de lactación mostró una gran fluctuación entre tratamientos (1,07 a 1,56 Mcal kg MS⁻¹), la cual dependió de factores como los contenidos de almidón, el extracto etéreo, la MS, la FDN, la FDA, cenizas y la DIVFDN. Esta última, por tratarse de un forraje, adquiere especial relevancia como parámetro para estimar la ENL y, por ende, la calidad del ensilaje en la dieta de rumiantes (Muqier et al., 2023). Un ensilaje con menor contenido de FDN y FDA, y mayor contenido de almidón muestra valores más altos de ENL (Kung et al., 2008).

El TA y la DC desempeñaron un papel importante en la disminución de la cantidad de almidón. Los resultados mostraron el nivel más alto de almidón a los 60 días de TA y a una DC intermedia (600-60) coincidiendo con el contenido más alto de ENL y la mayor DIVMS. Der Bedrosian et al. (2012) observaron una menor cantidad de almidón conforme avanzaron los días de apertura del minisilo. Durante el ensilaje, las matrices hidrofóbicas de almidón y proteína que rodean los gránulos se descomponen; esta respuesta se intensifica con el almacenamiento prolongado, lo que aumenta la accesibilidad del almidón para su degradación por los microorganismos ruminales (Kung et al., 2018). El almidón es el principal carbohidrato del grano de maíz y puede representar hasta 33 % del aporte energético del ensilaje de maíz (Cueva et al., 2023). Este aspecto es relevante porque los forrajes pueden llegar a representar el 40 % o más del total de ENL consumida en la dieta del ganado lechero (Hristov et al., 2020).

La fracción soluble *a* y el tiempo *lag* mostraron una gran variación por efecto de la interacción del TA y la DC, sin un patrón de respuesta homogéneo. La explicación a estos resultados no es clara. Ha sido sugerido que la fracción *a* está más relacionada con la fase *lag* que con el reflejo directo de la fermentación de la parte soluble del sustrato (Dhanoa, 1988). Cuando la digestión *in vitro* del sustrato es reducida, podría deberse principalmente a que las enzimas o microorganismos fallan en la penetración de la fibra del sustrato más que por el tiempo de digestión (Tilley et al., 1969). Además, la heterogeneidad de los componentes podría haber influido en la variabilidad de la cinética de degradación. La fase *lag* incrementa por factores asociados a la madurez de la planta, como lo es el contenido de lignina (Coblentz et al., 2000), el cual afecta la degradabilidad ruminal de la FDN.

La variabilidad de la digestibilidad es mayor en la parte vegetativa que en el grano. Además, correlaciones negativas entre la digestibilidad del forraje y el contenido de FDN y FDA impactan en la calidad nutricional del forraje (Núñez et al., 2015). La disminución de la DIVMS a las 72 horas de incubación debido al TA ha sido observada de igual manera por otros autores (Hall & Mertens, 2008). Una disminución de la DIVFDN de 62,73 % a 60,05 % con un TA de 45 y 150 días, respectivamente, fue documentada por Young et al. (2012). Sin embargo, el TA por sí solo no explicaría por completo el efecto sobre la DIVFDN. Rossi et al. (2023) observaron una disminución de la DIVFDN conforme incrementó el TA de 120 a 360 días; fenómeno asociado a la hidrólisis de la hemicelulosa causada principalmente por el medio ácido del silo como consecuencia de la fermentación. La desaparición de hemicelulosa aumenta proporcionalmente la concentración de la fracción indigestible de la fibra en los ensilajes almacenados por largo tiempo (Rossi et al., 2023), lo que explicaría la disminución de la DIVFDN.

Variaciones en la digestibilidad *in vitro* de la fibra detergente neutra en ensilaje con 90 días de TA también se han reportado y atribuido al factor genético (Cherney et al., 2004). El efecto del TA sobre la DIVFDN se relaciona con la solubilidad de la fibra durante la fermentación del forraje (Der Bedrosian et al., 2012). En el presente trabajo, la DIVFDN y la MS por acción de los microorganismos ruminales ocurrió en distintos patrones entre los niveles de DC y TA. Esta variación podría estar asociada a los componentes químicos del forraje (Krizsan et al., 2012), con repercusiones en la digestibilidad y la eficiencia de utilización de la energía en el animal, tal como lo reflejó la ENL estimada.

La interacción de los factores TA y DC afectó la cinética de degradación, específicamente a la fracción *a* y *Lag*. La fracción *Lag* en los forrajes incrementa con la madurez de la planta (Coblentz et al., 2000), lo cual se asocia a un alto contenido de fibra. Una mayor FDN, FDA y ALM contribuye a la producción de gas. Martínez-Loperena et al. (2011) reportaron incrementos en la producción de gas debido al alto contenido de FDN del sustrato. Tian et al. (2020) registraron una mejoría en la degradación *in vitro* del ensilaje al combinar una alta DC con complejos de inoculantes y enzimas, y recomendaron una DC de 500 kg MS m⁻³.

Existe poca información disponible acerca del efecto de la DC sobre la cinética de degradación *in vitro* del ensilaje. Se ha reportado que cuando la densidad de compactación se incrementa hay más masa seca recuperada y mayor contenido energético del ensilaje; asimismo, la digestibilidad *in vitro* de la MS y de la FDN del ensilaje aumenta (Sucu et al., 2016). Estos resultados son opuestos a lo observado con ambas digestibilidades en el presente estudio. El efecto positivo se atribuye a una mejor conservación de los carbohidratos solubles y proteínas del ensilaje, así como a menos cambios en los carbohidratos estructurales; todo ello asociado a la baja infiltración del aire y, por tanto, a la reducción de las pérdidas por oxidación durante el almacenamiento del ensilaje (Sucu et al., 2016).

El efecto de la DC sobre la cinética de degradación podría depender de factores como la cantidad de aire atrapado en el silo y la integridad de los silos durante el almacenamiento (Kung et al., 2021). El empacado o sellado hermético es un elemento que afecta a la calidad nutricional del ensilaje y está estrechamente relacionado con la DC porque minimiza la entrada de aire, lo que podría resultar en respiración aeróbica e incremento calórico en el silo (Sucu et al., 2016).

El efecto de la temperatura sobre la comunidad microbiana prevaleciente durante el proceso de fermentación del material vegetal y a lo largo del TA del ensilaje no puede ser ignorado. Las diferentes DC afectaron directamente la calidad nutricional del ensilaje. La integridad de las estructuras del material vegetal (hoja y tallo) y la conservación de jugos se pueden comprometer con una excesiva DC y disminuir la calidad del ensilaje. No obstante, una alta DC no garantiza una mejor calidad del ensilaje (Liu et al., 2024).

Conclusiones

La densidad de compactación y el tiempo de almacenamiento estuvieron interrelacionados e influyeron en la composición nutricional del ensilaje de maíz. Sin embargo, su efecto sobre la cinética de degradación ruminal *in vitro* fue inconsistente. El aumento de la densidad de compactación y del tiempo de almacenamiento afectó la digestibilidad *in vitro* de la materia seca y de la fibra detergente neutra.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación de México por la beca n.º 003224 otorgada a Christian Humberto Casillas-Gómez para la realización de su tesis de posgrado, y a la Universidad de Guadalajara por las facilidades brindadas para la elaboración de este trabajo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Arriaga-Jordán, C. M., Flores-Gallegos, F. J., Peña-Carmona, G., Albarrán-Portillo, B., García-Martínez, A., Espinoza-Ortega, A., González-Esquível, C. E., & Castelán-Ortega, O. A. (2001). Participatory on-farm evaluation of the response to concentrate supplementation by cows in early lactation in smallholder peasant (campesino) dairy production systems in the highlands of central Mexico. *Journal of Agricultural Science*, 137(1), 97-103. <https://doi.org/10.1017/S0021859601001095>

- Bal, M. A. (2006). Effects of hybrid type, stage of maturity, and fermentation length on whole plant corn silage quality. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 30(3), 331-336. <https://journals.tubitak.gov.tr/veterinary/vol30/iss3/9/>
- Bernardes, T. F., Daniel, J. L. P., Adesogan, A. T., McAllister, T. A., Drouin, P., Nussio, L. G., Huhtanen, P., Tremblay, G. F., Bélanger, G., & Cai, Y. (2018). Silage review: Unique challenges of silages made in hot and cold regions. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4001-4019. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13703>
- Borreani, G., Tabacco, E., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., & Muck, R. E. (2018). Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 3952-3979. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13837>
- Bravo-Quirino, F. (2008). *Manejo, conservación y utilización del ensilaje de maíz forrajero* (1.^a ed.). Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuicola y Forestal del Estado de México (ICAMEX).
- Cherney, D. J. R., Cherney, J. H., & Cox, W. J. (2004). Fermentation characteristics of corn forage ensiled in mini-silos. *Journal of Dairy Science*, 87(12), 4238-4246. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73569-9](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73569-9)
- Coblentz, W. K., Coffey, K. P., Turner, J. E., Scarbrough, D. A., Weyers, J. S., Harrison, K. F., Johnson, Z. B., Daniels, L. B., Rosenkrans Jr., C. F., Kellogg, D. W., & Hubbell, D. S. (2000). Effect of maturity on degradation kinetics of sod-seeded cereal grain forage grown in northern Arkansas. *Journal of Dairy Science*, 83(11), 2499-2511. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75142-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75142-3)
- Cueva, S. F., Harper, M., Roth, G. W., Wells, H., Canale, C., Gallo, A., Masoero, F., & Hristov, A. N. (2023). Effects of ensiling time on corn silage starch ruminal degradability evaluated *in situ* or *in vitro*. *Journal of Dairy Science*, 106(6), 3961-3974. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22817>
- Der Bedrosian, M. C., Nestor, K. E. Jr., & Kung, L., Jr. (2012). The effects of hybrid, maturity, and length of storage on the composition and nutritive value of corn silage. *Journal of Dairy Science*, 95(9), 5115-5126. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4833>
- Dhanoa, M. S. (1988). On the analysis of dacron bag data for low degradability feeds. *Grass and Forage Science*, 43(4), 441-444. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1988.tb01901.x>
- Gallo, A., Bernardes, T. F., Copani, G., Fortunati, P., Giuberti, G., Bruschi, S., Bryan, K. A., Nielsen, N. G., Witt, K. L., & Masoero, F. (2018). Effect of inoculation with *Lactobacillus buchneri* LB1819 and *Lactococcus lactis* O224 on fermentation and mycotoxin production in maize silage compacted at different densities. *Animal Feed Science and Technology*, 246, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.09.009>
- Hall, M. B., & Mertens, D. R. (2008). *In vitro* fermentation vessel type and method alter fiber digestibility estimates. *Journal of Dairy Science*, 91(1), 301-307. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-689>
- Horwitz, W., & Latimer, G. (2006). *Official methods of analysis of AOAC international* (18.^a ed.). AOAC International.
- Hristov, A. N., Harper, M. T., Roth, G., Canale, C., Huhtanen, P., Richard, T. L., & DiMarco, K. (2020). Effects of ensiling time on corn silage neutral detergent fiber degradability and relationship between laboratory fiber analyses and *in vivo* digestibility. *Journal of Dairy Science*, 103(3), 2333-2346. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16917>
- Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco. (2022). *Tepatitlán de Morelos, diagnóstico del municipio*. <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2022/10/Tepatitlan-de-Morelos.pdf>
- Jalč, D., Lauková, A., & Kišidayová, S. (2010). Effect of inoculants on fermentation parameters and chemical composition of grass and corn silages. *Slovak Journal of Animal Science*, 43(3), 141-146. <https://office.sjas-journal.org/index.php/sjas/article/view/346/334>

- Jessop, N. S., & Herrero, M. (1996). Influence of soluble components on parameter estimation using the *in vitro* gas production technique. *Proceedings of the British Society of Animal Science*, 1996, 626-627. <https://doi.org/10.1017/S1752756200592278>
- Johnson, L. M., Harrison, J. H., Davidson, D., Swift, M., Mahanna, W. C., & Shinnars, K. (2002). Corn silage management III: Effects of hybrid, maturity, and processing on nitrogen metabolism and ruminal fermentation. *Journal of Dairy Science*, 85(11), 2928-2947. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(02\)74380-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(02)74380-4)
- Krizsan, S. J., Nyholm, L., Nousiainen, J., Südekum, K.-H., & Huhtanen, P. (2012). Comparison of *in vitro* and *in situ* methods in evaluation of forage digestibility in ruminants. *Journal of Animal Science*, 90(9), 3162-3173. <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4347>
- Kung, L., Jr., Moulder, B. M., Mulrooney, C. M., Teller, R. S., & Schmidt, R. J. (2008). The effect of silage cutting height on the nutritive value of a normal corn silage hybrid compared with brown midrib corn silage fed to lactating cows. *Journal of Dairy Science*, 91(4), 1451-1457. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0236>
- Kung, L., Jr., Savage, R. M., da Silva, E. B., Polukis, S. A., Smith, M. L., Johnson, A. C. B., & Miller, M. A. (2021). The effects of air stress during storage and low packing density on the fermentation and aerobic stability of corn silage inoculated with *Lactobacillus buchneri* 40788. *Journal of Dairy Science*, 104, 4206-4222. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19746>
- Kung, L., Jr., Shaver, R. D., Grant, R. J., & Schmidt, R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of Dairy Science*, 101(5), 4020-4033. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13909>
- Lisowski, A., Wójcik, J., Klonowski, J., Sypuła, M., Chlebowski, J., Kostyra, K., Nowakowski, T., Strzyk, A., Świętochowski, A., Dąbrowska, M., Mieszkalski, L., & Piątek, M. (2020). Compaction of chopped material in a mini silo. *Biomass and Bioenergy*, 139, Artículo 10563. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105631>
- Liu, J., Hao, J., Zhao, M., Yan, X., Jia, Y., Wang, Z., & Ge, G. (2024). Effects of different temperature and density on quality and microbial population of wilted alfalfa silage. *BMC Microbiology*, 24, Artículo 380. <https://doi.org/10.1186/s12866-024-03510-2>
- Martínez-Loperena, R., Castelán-Ortega, O. A., González-Ronquillo, M., & Estrada-Flores, J. G. (2011). Determinación de la calidad nutritiva, fermentación *in vitro* y metabolitos secundarios en arvenses y rastrojo de maíz utilizados para la alimentación del ganado lechero. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 525-536. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/605>
- Mauricio, R. M., Mould, F. L., Dhanoa, M. S., Owen, E., Channa, K. S., & Theodorou, M. K. (1999). A semi-automated *in vitro* gas production technique for ruminant feedstuff evaluation. *Animal Feed Science and Technology*, 79(4), 321-330. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(99\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00033-4)
- McAllister, T. A., & Hristov, A. N. (2000). The fundamentals of making good quality silage. *Advances in Dairy Technology*, 12, 381-399.
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., & Wilkinson, R. G. (2013). *Nutrición Animal* (7.ª ed.). Editorial Acribia.
- Menke, K. H., & Steingass, H. (1988). Estimation of energetic feed value obtained from chemical analysis and *in vitro* gas production using rumen fluid. *Animal Research and Development*, 28, 7-55.

- Muqier, X., Eknæs, M., Prestløkken, E., Jensen, R. B., Eikanger, K. S., Karlengen, I. J., Trøan, G., Vhile, S. G., & Kidane, A. (2023). *In vitro* rumen fermentation characteristics, estimated utilizable crude protein and metabolizable energy values of grass silages, concentrate feeds and their mixtures. *Animals*, 13(17), Artículo 2695. <https://doi.org/10.3390/ani13172695>
- National Research Council. (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle* (7.^a ed.). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9825>
- Nkosi, B. D., Meeske, R., Langa, T., & Thomas, R. S. (2011). Effects of bacterial silage inoculants on whole-crop maize silage fermentation and silage digestibility in rams. *South African Journal of Animal Science*, 41(4), 350-359. <https://doi.org/10.4314/sajas.v41i4.5>
- Núñez, H. G., Anaya, S. A., Faz, C. R., & Serrato, M. H. A. (2015). Híbridos de maíz forrajero con alto potencial de producción de leche de bovino. *AGROFAZ*, 15(1), 47-56.
- Pell, A. N., & Schofield, P. (1993). Computerized monitoring of gas production to measure forage digestion *in vitro*. *Journal of Dairy Science*, 76(4), 1063-1073. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(93\)77435-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(93)77435-4)
- Rossi, L. G., Andrade, M. E. B., Rabelo, C. H. S., Siqueira, G. R., Vicente, E. F., Silva, W. L., Silva, M. M., & Reis, R. A. (2023). Flint corn silage management: influence of maturity stage, inoculation with *Lentilactobacillus buchneri*, and storage time on fermentation pattern, aerobic stability, and nutritional characteristics. *Frontiers in Microbiology*, 14, Artículo 1223717. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1223717>
- Ruppel, K. A., Pitt, R. E., Chase, L. E., & Galton, D. M. (1995). Bunker silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 78(1), 141-153. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76624-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76624-3)
- Sucu, E., Kalkan, H., Canbolat, O., & Filya, I. (2016). Effects of ensiling density on nutritive value of maize and sorghum silages. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 45(10), 596-603. <https://doi.org/10.1590/S1806-92902016001000003>
- Sun, L., Na, N., Li, X., Li, Z., Wang, C., Wu, X., & Yang, F. (2021). Impact of packing density on the bacterial community, fermentation, and *in vitro* digestibility of whole-crop barley silage. *Agriculture*, 11(7), Artículo 672. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070672>
- Tian, J., Xu, N., Liu, B., Huan, H., Gu, H., Dong, C., & Ding, C. (2020). Interaction effect of silo density and additives on the fermentation quality, microbial counts, chemical composition and *in vitro* degradability of rice straw silage. *Bioresource Technology*, 297, Artículo 122412. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122412>
- Tilley, J. M. A., Terry, R. A., Deriaz, R. E., & Outen, G. E. (1969). The digestibility of structural carbohydrates of grasses by rumen micro-organisms *in vitro*. *Grass and Forage Science*, 24(3), 238-243. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1969.tb01075.x>
- Toruk, F., & Koc, F. (2009). Effects on silage quality and aerobic stability of different compaction levels in sunflower silage. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 15(3), 269-275. <https://www.agrojournal.org/15/03-13.htm>
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, and nonstarch 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)
- Velho, J. P., Mühlbach, P. R. F., Nörnberg, J. L., Velho, I. M. P. H., Genro, T. C. M., & Kessler, J. D. (2007). Composição bromatológica de silagens de milho produzidas com diferentes densidades de compactação. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36(Suppl. 5), 1532-1538. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007000700011>

- Windle, M. C., Walker, N., & Kung, L., Jr. (2014). Effects of an exogenous protease on the fermentation and nutritive value of corn silage harvested at different dry matter contents and ensiled for various lengths of time. *Journal of Dairy Science*, 97(5), 3053-3060. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7586>
- Young, K. M., Lim, J. M., Bedrosian, D., & Kung, L., Jr. (2012). Effect of exogenous protease enzymes on the fermentation and nutritive value of corn silage. *Journal of Dairy Science*, 95(11), 6687-6694. <https://doi.org/10.3168/jds.2012-5628>