



Producción y calidad de cinco variedades de sorgo BMR en el trópico seco de Costa Rica*

Yield and quality of five BMR sorghum varieties in the dry tropics of Costa Rica

José Roberto Camacho-Montero¹, José Pablo Jiménez-Castro¹, Josselyne Aguilar-López¹,
William Sánchez-Ledezma¹, Nevio Bonilla-Morales¹

* Recepción: 11 de noviembre, 2025. Aceptación: 12 de marzo, 2026. Este trabajo formó parte del proyecto de investigación “Evaluación y Selección de Materiales de Sorgo BMR por su Aptitud Agronómica y Calidad Forrajera”, financiado por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA), Costa Rica.

¹ Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA). San José, Costa Rica. rcamachom@inta.go.cr (autor para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0001-8810-5437>); jppjimenez@inta.go.cr (<https://orcid.org/0000-0002-2136-3076>); jaguilarlopez20@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0003-0066-3787>); wsanchez@inta.go.cr (<https://orcid.org/0000-0002-3470-7237>); nbonilla@inta.go.cr (<https://orcid.org/0000-0001-6664-8377>).

Resumen

Introducción. El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es una gramínea C4 destacada por su alta productividad y tolerancia al estrés hídrico y calórico, utilizada en la alimentación animal. La incorporación del gen BMR (nervadura central café) mejora su valor forrajero al reducir el contenido de fibra y aumentar la digestibilidad. **Objetivo.** Evaluar el rendimiento productivo y la calidad bromatológica de cinco variedades de sorgo BMR, con el fin de identificar líneas promisorias para su uso como recurso forrajero en sistemas ganaderos del trópico seco. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en el Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez (Cañas, Guanacaste, Costa Rica) durante la época lluviosa de 2020 y la seca de 2021 (bajo riego). Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Los tratamientos incluyeron cinco líneas BMR (0916, 0919, 0925, 0929 y 0936), derivadas de cruzamientos entre materiales BMR de Texas (EE. UU.) y germoplasma centroamericano. Se utilizó como testigo el sorgo negro forrajero (*Sorghum almum*). Se evaluaron variables agronómicas y de calidad nutricional del forraje fresco y ensilado. **Resultados.** Aunque las variedades BMR tuvieron menor producción de biomasa y ciclos más cortos que el testigo, su calidad nutricional fue superior en ambas temporadas. **Conclusiones.** Las variedades de sorgo BMR presentaron menor rendimiento de biomasa que el sorgo negro forrajero, pero mostraron ventajas nutricionales, lo que respalda su potencial como alternativa forrajera estratégica en sistemas bovinos del trópico seco de Costa Rica.

Palabras clave: mutantes *brown midrib*, ensilado, eficiencia alimenticia, valor nutritivo.

Abstract

Introduction. Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) is a C4 grass recognized for its high productivity and tolerance to heat and drought stress, widely used in animal feeding. The incorporation of the brown midrib (BMR) gene enhances its forage value by reducing fiber content and increasing digestibility. **Objective.** To evaluate the productive



Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

performance and bromatological quality of five BMR sorghum varieties, in order to identify promising lines for use as a forage resource in livestock systems of the dry tropics. **Materials and methods.** The study was conducted at the Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez (Cañas, Guanacaste, Costa Rica) during the 2020 rainy season and the 2021 dry season (under irrigation). A randomized complete block design with four replications was used. Treatments included five BMR lines (0916, 0919, 0925, 0929, and 0936), derived from crosses between BMR materials from Texas (USA) and Central American germplasm. Forage black sorghum (*Sorghum alnum*) was used as the control. Agronomic variables and nutritional quality of fresh and ensiled forage were evaluated. **Results.** Although the BMR varieties showed lower biomass production and shorter crop cycles than the control, they exhibited superior nutritional quality in both seasons. **Conclusions.** BMR sorghum varieties showed lower biomass yield than forage black sorghum but exhibited nutritional advantages, supporting their potential as a strategic forage alternative in cattle production systems of the Costa Rican dry tropics.

Keywords: brown midrib mutants, silage, feed efficiency, nutritive value.

Introducción

El sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) es el quinto cereal de mayor importancia a nivel mundial, precedido por el trigo, el maíz, el arroz y la cebada (Food and Agriculture Organization of the United Nations, s. f.). Es una gramínea tropical de origen africano que posteriormente se difundió hacia Asia, particularmente a la India y China, y más tarde fue introducida en América, incluyendo Estados Unidos y Centroamérica (Doggett, 1988). En Costa Rica, durante la década de 1980 el sorgo fue considerado uno de los granos básicos más importantes, alcanzando 30 086 ha cultivadas entre 1985 y 1986 (Guevara, 1988).

Este cereal ha sido utilizado para la fabricación de alimentos concentrados en los sectores avícola, porcino y bovino, así como en forma de harina para la industria de panificación (Heuzé et al., 2015). También se ha utilizado como forraje en la alimentación de rumiantes, ya sea en forma de ensilaje o corte fresco (Ferreira et al., 2024), debido a su alto contenido energético y a su capacidad de rebrote tras la cosecha. Estas características lo convierten en una alternativa forrajera de interés en sistemas de producción animal, particularmente en regiones tropicales donde se requieren especies con alta adaptabilidad y productividad.

Un inconveniente para la utilización del sorgo como forraje es su alto contenido de fibras no digeribles para los rumiantes, especialmente lignina, lo que limita la degradación en el rumen, reduce la disponibilidad de energía y proteína metabolizable y, en consecuencia, disminuye la eficiencia productiva del animal (Stypinski et al., 2024). Ante esta limitación y con el fin de incrementar su potencial forrajero, se han identificado mutaciones naturales que posteriormente han sido seleccionadas en programas de mejoramiento genético, correspondientes a alelos recesivos que, en condición homocigota, reducen el contenido de lignina y generan una coloración café en la nervadura central de las hojas. Estos materiales, conocidos como “nervadura central café” o BMR (*brown midrib*), se distinguen por este marcador fenotípico característico (Oliver et al., 2005; Sattler et al., 2010; Suhartanto et al., 2024).

El Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Costa Rica, en conjunto con otras naciones centroamericanas, la Universidad de Texas A&M y el International Sorghum and Millet Collaborative Research Support Program (INTSORMIL-CRSP), lograron identificar genotipos de sorgo BMR destacados por su aptitud forrajera con potencial de adaptación a las condiciones edafoclimáticas centroamericanas. Estos materiales representan una alternativa prometedora para mejorar la disponibilidad y calidad del forraje en sistemas de producción bovina de la región. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación consistió en evaluar el rendimiento productivo y la calidad bromatológica de cinco variedades de sorgo BMR, con el fin de identificar líneas promisorias para su uso como recurso forrajero en sistemas ganaderos del trópico seco.

Materiales y métodos

Localización y establecimiento del cultivo de sorgo

El experimento se desarrolló en el Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (INTA) ubicada en Cañas, Guanacaste (latitud 10.341343°N y longitud -85.135455°O), a una altura de 16 m s. n. m. La temperatura promedio fue de 28,4 °C con máximos y mínimos de 32,6 y 24,1 °C, respectivamente, una humedad relativa media de 71,4 % y una precipitación mensual promedio de 103,7 mm con 18 días con lluvia por mes entre mayo y noviembre (Instituto Meteorológico Nacional, 2021). En el sitio prevalecen órdenes de suelo Mollisoles e Inceptisoles y zonas de vida de bosque tropical seco (Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014).

La evaluación en campo se llevó a cabo durante la estación lluviosa de 2020 y la estación seca de 2021 con aplicación de riego. Se preparó de forma convencional un terreno de 588 m² mediante un pase de rastra rompedora y dos pases de rastra liviana. El área total se dividió en cuatro bloques, cada uno subdividido en seis parcelas correspondientes a las variedades BMR-0916, BMR-0919, BMR-0925, BMR-0929 y BMR-0936, además de sorgo negro forrajero (*Sorghum almum*) como testigo, comúnmente utilizado por los productores. Este arreglo permitió establecer las unidades experimentales bajo un diseño de bloques completos al azar.

La siembra en época lluviosa se realizó en agosto de 2020 y la siembra en época seca en enero de 2021. Ambas siembras se efectuaron de forma manual con un espaciamiento entre surcos de 70 cm y una densidad de 20 kg ha⁻¹ de semilla, depositada al fondo del surco a una profundidad no mayor de 2 cm. Se aplicaron dos fertilizaciones al cultivo: la primera al momento de la siembra con una fórmula 10-30-10 (N-P-K), equivalente a 30 kg ha⁻¹ de N, 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 30 kg ha⁻¹ de K₂O; la segunda consistió en una fertilización nitrogenada con urea (46-0-0), equivalente a 170 kg ha⁻¹ de N, aplicada 35 días después de la emergencia.

El control de arvenses se realizó en preemergencia con 1,5 L ha⁻¹ de atrazina y 2 kg ha⁻¹ de pendimetalina, mientras que el control posemergente de hojas anchas se efectuó con bentazon a 2 L ha⁻¹. Se efectuó control químico mediante aplicación foliar para el manejo del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y del pulgón amarillo de la caña de azúcar (*Melanaphis sacchari*). Estas prácticas agronómicas se implementaron para garantizar un adecuado establecimiento y desarrollo del cultivo.

Cosecha de sorgo y elaboración de los silos

Las plantas de cada parcela se cosecharon de manera manual en el primer corte, tanto durante la época lluviosa como en la época seca, cuando el grano alcanzó el estado lechoso-pastoso, correspondiente a 92 días después de la siembra en la época lluviosa y 85 días después de la siembra en la época seca. El corte se realizó desde la base a 5 cm sobre el suelo. Posteriormente, se trocearon con una picadora de motor de gasolina hasta obtener un tamaño de partícula de entre 1,5 y 2 cm.

A partir del material picado, se elaboraron microsilos de 15 kg por variedad, en bolsas de polietileno de 0,18 mm de grosor. La fermentación se desarrolló a partir de la microbiota epífita natural del material, sin la adición de inoculantes. El aire se extrajo con una aspiradora eléctrica de uso común y las bolsas se cerraron herméticamente para evitar la entrada de oxígeno.

Variables evaluadas

Para cada variedad, previo a la cosecha se midió la altura de la planta desde la base hasta el extremo de la panoja más alta, seleccionando tres plantas de forma aleatoria en los surcos centrales de la parcela. Los días a floración se registraron desde la emergencia del cultivo hasta alcanzar el 50 % de floración. El rendimiento de materia seca (kg ha^{-1}) se determinó al cosechar dos metros lineales en los surcos centrales, cortar las plantas desde la base e incluir las panojas en estado pastoso suave, y pesar el rendimiento fresco con una balanza electrónica con capacidad máxima de 8 kg y precisión de 2 g.

Se tomaron muestras de 500 g de forraje fresco picado y de los ensilados con 40 días de fermentación para determinar materia seca (MS), proteína cruda (PC) y cenizas (Ce) según AOAC International (2002), así como fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y lignina (Lig) según Van Soest et al. (1991). En el material ensilado además se determinó la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS) (Van Soest, 1991) y el pH a temperatura ambiente (25°C) en el jugo acumulado mediante un pH-metro digital previamente calibrado. La energía neta de lactancia (ENL) del material fresco se estimó a partir de la ecuación propuesta por Adams (1994). Las muestras de forraje fresco y ensilado se analizaron en el Laboratorio de Nutrición Animal del INTA para determinar la calidad nutritiva.

Análisis estadístico

El efecto de las variedades de sorgo sobre las variables de rendimiento, altura, floración y composición química y nutricional en el material fresco y ensilado se analizó mediante un diseño de bloques completos al azar con una estructura de tratamientos unifactorial, donde el único factor correspondió a las seis variedades evaluadas. Los bloques se establecieron para controlar la variabilidad espacial del terreno experimental; sin embargo, no se identificó un gradiente dominante de suelo que condicionara una orientación específica, por lo que su disposición se realizó de manera uniforme en el área experimental. Los datos se analizaron mediante modelos lineales generales y mixtos utilizando el *software* InfoStat versión 2020. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 5 %, luego de haber verificado el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homocedasticidad.

Resultados

Rendimiento

En ambas temporadas, el sorgo negro presentó mayor altura ($p < 0,05$) y mayor rendimiento de biomasa seca ($p < 0,05$), pero una floración significativamente más tardía ($p < 0,05$) que los materiales restantes de *Sorghum bicolor*. La variedad BMR-0925 obtuvo la menor altura ($p < 0,05$) en ambas temporadas. Sin embargo, en cuanto al rendimiento de biomasa seca, no se presentaron diferencias ($p > 0,05$) entre las variedades BMR.

El sorgo negro fue entre 71 y 85 % más alto que las variedades BMR durante las temporadas lluviosa y seca con riego, respectivamente. Durante la temporada lluviosa, superó en rendimiento de biomasa seca a las variedades BMR en un 47 %. En la época seca con riego, el rendimiento fue aproximadamente 2,2 veces superior al de las variedades BMR (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variables de rendimiento, altura y floración de seis genotipos de sorgo cosechados en temporada lluviosa y temporada seca con riego. Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez - INTA, Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2020-2021.

Table 1. Yield, height, flowering and maturity variables of six sorghum genotypes harvested in the rainy season and dry season with irrigation. Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez - INTA, Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2020-2021.

Variables	BMR-0916	BMR-0919	BMR-0925	BMR-0929	BMR-0936	Sorgo negro	EEM
Temporada lluviosa							
Altura (cm)	208,8 ^b	179,2 ^{bc}	154,1 ^c	186,9 ^{bc}	190,8 ^{bc}	326,6 ^a	9,89
Floración (días)	84 ^b	86 ^b	76 ^c	86 ^b	86 ^b	107 ^a	1,51
Biomasa fresca por cosecha (kg ha ⁻¹)	36 000 ^{bc}	48 344 ^a	32 794 ^c	50 688 ^a	45 138 ^{ab}	51 918 ^a	2739,5
Biomasa seca por cosecha (kg ha ⁻¹)	7577 ^b	8993 ^b	6422 ^b	9423 ^b	9063 ^b	13 355 ^a	675,2
Temporada seca con riego							
Altura (cm)	180,8 ^{bc}	157,6 ^c	164,0 ^c	197,0 ^b	205,4 ^b	379,8 ^a	6,07
Floración (días)	70 ^b	68 ^b	62 ^c	68 ^b	71 ^b	96 ^a	0,94
Biomasa fresca por cosecha (kg ha ⁻¹)	22 281 ^b	25 542 ^b	24 734 ^b	29 805 ^b	24 513 ^b	46 761 ^a	2078,7
Biomasa seca por cosecha (kg ha ⁻¹)	5475 ^b	6023 ^b	4901 ^b	7017 ^b	5833 ^b	12 383 ^a	561,9

EEM: Error estándar de la media. ^{abc} Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas. / **EEM:** Standard error of the mean. ^{abc} Different letters in the same column represent significant differences.

Calidad nutricional del forraje

En la temporada lluviosa, el sorgo negro presentó el mayor ($p < 0,05$) contenido de MS y FDN en comparación con las demás variedades evaluadas. La variedad BMR-0925 fue la única que superó ($p < 0,05$) al sorgo negro en el contenido de PC. A excepción de BMR-0929, todas las variedades BMR mostraron menor ($p < 0,05$) contenido de FDA y mayor ($p < 0,05$) contenido de ENL que el sorgo negro (Cuadro 2).

Durante la época seca con riego, no se encontraron diferencias ($p > 0,05$) en el contenido de MS entre las variedades BMR y el sorgo negro, excepto BMR-0925, que presentó el valor más bajo ($p < 0,05$). Tampoco se observaron diferencias ($p > 0,05$) en el contenido de PC entre las variedades BMR, aunque BMR-0916 fue la única que superó ($p < 0,05$) al sorgo negro. Los mayores ($p < 0,05$) contenidos de FDN, FDA y lignina se registraron en el sorgo negro, mientras que las variedades BMR no difirieron entre sí ($p > 0,05$) y presentaron valores superiores ($p < 0,05$) de ENL respecto al testigo. En cuanto a las cenizas, solo se observaron diferencias entre BMR-0925 y BMR-0936 (Cuadro 2).

Calidad nutricional de los ensilados

En la temporada lluviosa, los contenidos de MS, FDN y FDA de los ensilados de las variedades BMR fueron menores ($p < 0,05$) en comparación con el ensilado de sorgo negro; solamente el ensilado de BMR-0925 superó ($p < 0,05$) el contenido de PC del ensilado de sorgo negro, tal como sucedió en el material preensilado. En las variedades BMR, los materiales BMR-0916, BMR-0919 y BMR-0925 no mostraron diferencias ($p > 0,05$) entre sí en el contenido de PC, mientras que BMR-0929 y BMR-0936 tuvieron contenidos de PC menores ($p < 0,05$)

Cuadro 2. Composición nutricional de la planta entera de seis genotipos de sorgo cosechados en temporada lluviosa y temporada seca con riego. Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez - INTA, Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2020-2021.

Table 2. Nutritional composition of the whole plant of six sorghum genotypes harvested in the rainy season and dry season with irrigation. Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez - INTA, Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2020-2021.

Variables	BMR-0916	BMR-0919	BMR-0925	BMR-0929	BMR-0936	Sorgo negro	EEM
Temporada lluviosa							
MS (%)	21,0 ^b	18,4 ^b	19,4 ^b	18,6 ^b	20,2 ^b	25,7 ^a	0,61
PC (%)	9,5 ^{ab}	9,2 ^{ab}	11,3 ^a	8,6 ^{ab}	8,1 ^b	6,9 ^b	0,61
FDN (%)	56,6 ^b	58,7 ^b	59,7 ^b	59,3 ^b	58,6 ^b	69,9 ^a	0,93
FDA (%)	33,2 ^{bc}	34,0 ^{bc}	32,0 ^c	36,3 ^{ab}	34,3 ^{bc}	39,7 ^a	0,85
Lig (%)	2,1	1,5	0,9	2,8	1,4	2,2	0,47
Ce (%)	9,4	10,1	9,4	9,9	9,7	9,6	0,47
ENL (Mcal/kg MS)	1,48 ^{ab}	1,46 ^{ab}	1,52 ^a	1,40 ^{bc}	1,45 ^{ab}	1,30 ^c	0,02
Temporada seca con riego							
MS (%)	24,6 ^a	23,5 ^a	19,8 ^b	23,5 ^a	23,7 ^a	26,5 ^a	0,81
PC (%)	9,2 ^a	8,4 ^{ab}	7,5 ^{ab}	8,0 ^{ab}	7,0 ^{ab}	5,3 ^b	0,78
FDN (%)	58,8 ^b	56,4 ^b	58,0 ^b	57,4 ^b	60,2 ^b	71,9 ^a	1,16
FDA (%)	30,9 ^b	29,2 ^b	31,5 ^b	30,3 ^b	30,9 ^b	42,7 ^a	0,91
Lig (%)	2,6 ^b	1,8 ^b	2,4 ^b	1,8 ^b	1,8 ^b	5,3 ^a	0,32
Ce (%)	9,9 ^{ab}	10,3 ^{ab}	11,1 ^a	9,6 ^{ab}	9,0 ^b	9,7 ^{ab}	0,41
ENL (Mcal/kg MS)	1,55 ^a	1,59 ^a	1,53 ^a	1,56 ^a	1,55 ^a	1,22 ^b	0,03

MS: Materia seca. **PC:** Proteína cruda. **FDN:** Fibra detergente neutro. **FDA:** Fibra detergente ácido. **Lig:** Lignina. **Ce:** Cenizas. **ENL:** Energía neta de lactancia. **EEM:** Error estándar de la media. ^{abc} Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas. / **MS:** Dry matter. **PC:** Crude protein. **FDN:** Neutral detergent fiber. **FDA:** Acid detergent fiber. **Lig:** Lignin. **Ce:** Ash. **ENL:** Net energy of lactation. **EEM:** Standard error of the mean. ^{abc} Different letters in the same column represent significant differences.

que BMR-0925. Las variedades BMR-0925, BMR-0929 y BMR-0936 mostraron una mayor ($p < 0,05$) DIVMS respecto al sorgo negro, lo que concuerda con los menores contenidos de pared celular encontrados. El pH final de los ensilados fue menor ($p < 0,05$) en los sorgos BMR, aunque todos, incluido el sorgo negro, presentaron valores inferiores a 4,2.

En la temporada seca con riego, los contenidos de PC y DIVMS de las variedades BMR superaron ($p < 0,05$) al sorgo negro y presentaron menores ($p < 0,05$) contenidos de FDA. Para el contenido de MS, el sorgo negro no difirió ($p > 0,05$) de BMR-0916, BMR-0919 ni BMR-0936, mientras que las menores ($p < 0,05$) concentraciones se registraron en BMR-0925 y BMR-0929. A diferencia de la temporada lluviosa, el contenido de FDN de las variedades BMR, excepto BMR-0929, no presentó diferencias ($p > 0,05$) con el sorgo negro; tampoco se observaron diferencias ($p > 0,05$) entre ellas. Los valores de cenizas más altos ($p < 0,05$) ocurrieron en BMR-0919 y BMR-0925, y los más bajos ($p < 0,05$) en BMR-0929 y BMR-0936, con el sorgo negro en una posición intermedia. Los valores de pH más bajos ($p < 0,05$) se registraron en el sorgo negro y en las variedades BMR-0919, BMR-0925 y BMR-0929 (Cuadro 3).

Cuadro 3. Composición nutricional, digestibilidad *in vitro* de la materia seca y pH de ensilado de seis genotipos de sorgo cosechados en temporada lluviosa y temporada seca con riego. Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez - INTA, Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2020-2021.

Table 3. Nutritional composition, *in vitro* dry matter digestibility and pH of six silage genotypes harvested in the rainy season and dry season with irrigation. Centro de Innovación Agropecuaria Enrique Jiménez Núñez - INTA, Cañas, Guanacaste, Costa Rica. 2020-2021.

Variables	BMR-0916	BMR-0919	BMR-0925	BMR-0929	BMR-0936	Sorgo negro	EEM
Temporada lluviosa							
MS (%)	22,7 ^a	21,6 ^a	19,6 ^a	21,9 ^a	22,0 ^a	26,7 ^b	0,65
PC (%)	8,6 ^{ab}	8,7 ^{ab}	10,3 ^a	8,0 ^b	7,0 ^b	7,4 ^b	0,47
FDN (%)	59,9 ^b	58,3 ^b	56,3 ^b	58,2 ^b	58,4 ^b	67,5 ^a	1,50
FDA (%)	33,9 ^b	32,7 ^b	31,4 ^b	32,3 ^b	32,9 ^b	42,3 ^a	1,05
Lig (%)	2,0	1,6	1,7	1,6	2,5	1,5	0,26
Ce (%)	8,5	8,8	8,0	8,8	8,9	9,2	0,33
DIVMS (%)	62,3 ^{bc}	66,4 ^{abc}	70,9 ^{ab}	72,7 ^a	67,7 ^{ab}	57,3 ^c	2,15
pH	3,8 ^b	3,7 ^b	3,7 ^b	3,7 ^b	3,7 ^b	4,1 ^a	0,03
Temporada seca con riego							
MS (%)	24,0 ^{ab}	22,9 ^{ab}	19,5 ^c	21,2 ^{bc}	23,4 ^{ab}	25,1 ^a	0,71
PC (%)	7,1 ^a	6,9 ^a	8,0 ^a	6,8 ^a	7,2 ^a	4,6 ^b	0,36
FDN (%)	64,6 ^{ab}	63,2 ^{ab}	64,0 ^{ab}	61,0 ^b	66,0 ^{ab}	68,9 ^a	1,59
FDA (%)	36,1 ^b	34,1 ^b	37,5 ^b	34,6 ^b	37,0 ^b	42,9 ^a	1,08
Lig (%)	2,3	4,3	3,3	2,5	2,3	2,1	0,50
Ce (%)	9,9 ^{bc}	10,1 ^{ab}	10,8 ^a	8,6 ^e	8,8 ^{de}	9,4 ^{cd}	0,15
DIVMS (%)	78,7 ^a	81,7 ^a	80,4 ^a	81,9 ^a	77,4 ^a	63,2 ^b	1,69
pH	4,2 ^c	4,0 ^{ab}	4,0 ^{abc}	3,9 ^a	4,2 ^{bc}	4,0 ^{ab}	0,05

MS: Materia seca. **PC:** Proteína cruda. **FDN:** Fibra detergente neutro. **FDA:** Fibra detergente ácido. **Lig:** Lignina. **Ce:** Cenizas. **DIVMS:** Digestibilidad *in vitro* de la materia seca. **EEM:** Error estándar de la media. ^{abcde} Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas. / **MS:** Dry matter. **PC:** Crude protein. **FDN:** Neutral detergent fiber. **FDA:** Acid detergent fiber. **Lig:** Lignin. **Ce:** Ash. **DIVMS:** *In vitro* dry matter digestibility. **EEM:** Standard error of the mean. ^{abcde} Different letters in the same column represent significant differences.

Discusión

El rendimiento de biomasa seca fue significativamente mayor en el sorgo negro en ambas temporadas, con valores superiores a 12 000 kg ha⁻¹ frente a los 4901 a 9423 kg ha⁻¹ registrados en las variedades BMR. No se detectaron diferencias estadísticas entre los genotipos BMR, lo que confirma que la menor producción responde al efecto del gen BMR más que a variaciones entre líneas, en concordancia con Marsalis et al. (2010) y Pupo et al. (2022). Valores superiores han sido reportados en otras condiciones; Bean et al. (2013) registraron hasta 17 000 kg ha⁻¹ en sorgos forrajeros y 15 000 kg ha⁻¹ en materiales BMR, mientras que Amador y Boschini (2000) documentaron 10 450 kg ha⁻¹ para sorgo negro en Costa Rica. Estas comparaciones indican que, aunque los rendimientos absolutos varían según el ambiente y el manejo, la menor biomasa en BMR es consistente.

El contenido de PC varió significativamente entre genotipos y épocas. En la temporada lluviosa, BMR-0925 alcanzó el mayor valor (10,3 %), mientras que BMR-0936 y el sorgo negro registraron los más bajos; en la época

seca con riego, los valores disminuyeron en general, aunque las variedades BMR se mantuvieron entre 6,8 % y 8,0 %, en contraste con el descenso del sorgo negro (4,6 %). Resultados similares han sido reportados por Martínez (2018), Bean et al. (2013) y Pupo et al. (2022), quienes señalaron contenidos iguales o superiores en BMR frente a sorgos convencionales, atribuibles en parte a una mayor proporción de hojas (McCollum et al., 2005).

Estudios recientes también reportan valores de PC entre 11,10 % y 14,66 % en genotipos BMR, sin diferencias respecto a materiales no BMR en determinadas condiciones (Moura et al., 2025). Este mayor contenido proteico implica una mayor disponibilidad de nitrógeno para la microbiota ruminal y favorece la síntesis de proteína microbiana (Ferreira et al., 2018; Widodo et al., 2025). Los valores de FDN, FDA y lignina fueron consistentemente menores en las variedades BMR respecto al sorgo negro, tanto en la temporada lluviosa como en la seca con riego.

El testigo presentó promedios cercanos a 70 % de FDN y 40 % de FDA, mientras que las variedades BMR no superaron 60 % y 34 %, respectivamente, resultados que coinciden con los reportados por Martínez (2018) y Bean et al. (2013). Además, el contenido de lignina del sorgo negro fue aproximadamente 1,5 veces mayor que el promedio de las BMR, diferencia observada durante la época seca. Esta reducción en los componentes de la pared celular se asocia con una mayor digestibilidad de la fibra (Traxler et al., 1998). Evidencias recientes demuestran que los sorgos BMR tienen niveles significativamente más bajos de FDN, FDA y lignina, lo que mejora la digestibilidad de la fibra estructural (Suhartanto et al., 2024; Widodo et al., 2025). La menor proporción de fracciones estructurales en los BMR evidencia una ventaja funcional de importancia para sistemas de producción bovina en el trópico seco.

Las variedades BMR presentaron entre 12,5 y 27,5 % más ENL que el sorgo negro durante las temporadas lluviosa y seca con riego, respectivamente. Este mayor contenido energético también ha sido reportado en un metaanálisis reciente, donde se observó una mejor respuesta en producción de leche en vacas alimentadas con sorgos BMR frente a sorgo convencional (Widodo et al., 2025). En contraste, Marsalis et al. (2010) encontraron menores contenidos de ENL en sorgos forrajeros, tanto convencionales como BMR, y no hallaron diferencias significativas entre ambos grupos. Estas discrepancias entre estudios podrían estar relacionadas con diferencias genotípicas y con el momento de cosecha, factores que influyen directamente en los valores de ENL (Machado et al., 2015).

El pH de los materiales ensilados fue cercano a cuatro, lo que se considera un valor adecuado (McDonald et al., 1991). El contenido de MS previo al ensilado es un factor clave, ya que la actividad bacteriana durante la fermentación disminuye al aumentar la concentración de MS (Kaiser et al., 2004), por lo que niveles bajos de MS podrían favorecer el desarrollo de esta fase fermentativa. Asimismo, la temperatura del sitio donde se almacenan los ensilados puede influir en la dinámica de la fermentación (Aloba et al., 2022), lo que podría explicar el mayor pH observado durante la época seca.

Entre las limitaciones del presente estudio se debe considerar que la evaluación se llevó a cabo durante dos temporadas productivas y con un número limitado de repeticiones, por lo que la extrapolación de los resultados a otras condiciones edafoclimáticas debe realizarse con cautela. Además, no se incluyó un análisis económico ni evaluaciones en animales que permitan cuantificar el impacto productivo directo de las diferencias nutricionales observadas. A pesar de la menor producción de biomasa de las variedades BMR, el incremento en calidad nutricional sugiere un balance favorable entre rendimiento y valor nutritivo en sistemas ganaderos donde la eficiencia alimenticia es prioritaria. Desde la perspectiva del productor tropical, la selección de materiales BMR podría resultar ventajosa en sistemas intensivos o con alta demanda nutricional, donde la calidad del forraje tiene mayor impacto sobre la productividad animal que la cantidad de biomasa producida.

Conclusiones

Bajo condiciones del trópico seco de Costa Rica, las líneas de sorgo con el gen de nervadura central café evaluadas representan una alternativa forrajera viable para sistemas de producción que priorizan la calidad sobre

la cantidad de biomasa. El valor nutricional superior frente al testigo convencional respalda su incorporación estratégica en esquemas intensivos o de mayor exigencia productiva. Estos materiales se posicionan como una herramienta tecnológica útil frente a las limitaciones del trópico seco y sugieren oportunidades para programas de mejoramiento enfocados en el balance entre rendimiento y valor nutritivo del forraje. Futuros estudios deben orientarse a evaluar su desempeño en condiciones de alimentación animal, incluyendo ensayos de consumo, digestibilidad *in vivo* y respuesta productiva, con el fin de confirmar su impacto en sistemas de producción bovina.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Adams, R. S. (1994). Regression equations for estimating energy values of various feeds. En V. Ishler (Ed.), *From feed to milk: understanding rumen function* (pp. 14-27). Pennsylvania State University.
- Aloba, T. A., Corea, E. E., Mendoza, M., Dickhoefer, U., & Castro-Montoya, J. (2022). Effects of ensiling length and storage temperature on the nutritive value and fibre-bound protein of three tropical legumes ensiled alone or combined with sorghum. *Animal Feed Science and Technology*, 283, Artículo 115172. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115172>
- Amador, A. L., & Boschini, C. (2000). Calidad nutricional de la planta de sorgo negro forrajero (*Sorghum alnum*) para alimentación animal. *Agronomía Mesoamericana*, 11(2), 79-84. <https://doi.org/10.15517/am.v11i2.17315>
- AOAC International. (2002). *Official methods of analysis* (17.^a ed.). AOAC International.
- Bean, B. W., Baumhardt, R. L., McCollum III, F. T., & McCuistion, K. C. (2013). Comparison of sorghum classes for grain and forage yield and forage nutritive value. *Field Crops Research*, 142, 20-26. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.014>
- Doggett, H. (1988). *Sorghum* (2.^a ed.). Longman Scientific & Technical.
- Ferreira, D. de J., Costa Neta, C. de M., Zanine, A. de M., Santos, F. N. de S., Pereira, D. M., Campos, F. S., Parente, H. N., Parente, M. de O. M., Rodrigues, R. C., Santos, E. M., Da Silva de Sousa, F. C., & Alves, G. R. (2024). Sustainable production of forage sorghum for grain and silage production with moisture-retaining polymers that mitigate water stress. *Agronomy*, 14(8), Artículo 1653. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081653>
- Ferreira, D. A., Gonçalves, L. C., & Santos Rodrigues, J. A. (2018). Ruminal degradability of brown-midrib sorghum-Sudangrass hybrids for cutting and grazing. *Revista Ciência Agronômica*, 49(1), 141-149. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180016>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. Recuperado el 10 de marzo de 2026 de <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Guevara, A. L. (1988). Desarrollo de la investigación en sorgo de Costa Rica. *CEIBA*, 29(2), 221-229. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/4343/1/09%20U.pdf>
- Heuzé, V., Tran, G., & Lebas, F. (2015, 8 de octubre). *Sorghum grain*. Feedipedia. <https://www.feedipedia.org/node/224>

- Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Datos climáticos de la Estación Meteorológica Santa Gallo, Pococí, Limón* [Base de datos]. <https://www.imn.ac.cr/>
- Instituto Tecnológico de Costa Rica. (2014). *Atlas digital de Costa Rica* [CD-ROM].
- Kaiser, A. G., Piltz, J. W., Burns, H. M., & Griffiths, N. W. (2004). *Successful silage* (2.^a ed.). Dairy Australia, & New South Wales Department of Primary Industries.
- Machado, F. S., Rodríguez, N. M., Gonçalves, L. C., Rodrigues, J. A. S., Ribas, M. N., Pôssas, F. P., Jayme, D. G., Pereira, L. G. R., Chaves, A. V., & Tomich, T. R. (2015). Energy partitioning and methane emission by sheep fed sorghum silages at different maturation stages. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 67(3), 790-800. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-7177>
- Marsalis, M. A., Angadi, S. V., & Contreras-Govea, F. E. (2010). Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crops Research*, 116(1), 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.11.009>
- Martínez, A. (2018). *Tabla de composición bromatológica de forrajes utilizados para la alimentación de animales en Costa Rica*. Universidad de Costa Rica.
- McCollum, F. T., McCuiston, K., & Bean, B. (2005). Brown midrib and photoperiod-sensitive forage sorghums. En T. C. Jenkins & C. W. Rogers (Eds.), *Proceedings of the Plains Nutrition Council Spring Conference* (pp. 36-46). Texas A&M University.
- McDonald, P., Henderson, A. R., & Heron, S. J. E. (1991). *The biochemistry of silage*. Chalcombe Publications.
- Moura, M. M. A., Mizobutsi, E. H., De Campos, M. L., Costa, R. F., Pires Neto, O. S., Soares Santos, L. C., & Batista Fernandes, M. (2025). Assessment of the agronomic and nutritional characteristics of sorghum genotypes with and without brown midrib. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 47, Artículo e67709. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v47i1.67709>
- Oliver, A. L., Pedersen, J. F., Grant, R. J., & Klopfenstein, T. J. (2005). Comparative effects of the sorghum bmr-6 and bmr-12 genes: I. Forage sorghum yield and quality. *Crop Science*, 45(6), 2234-2239. <https://doi.org/10.2135/cropsci2004.0644>
- Pupo, M. R., Wallau, M. O., & Ferraretto, L. F. (2022). Effects of season, variety type, and trait on dry matter yield, nutrient composition, and predicted intake and milk yield of whole-plant sorghum forage. *Journal of Dairy Science*, 105(7), 5776-5785. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21706>
- Sattler, S. E., Funnell-Harris, D. L., & Pedersen, J. F. (2010). Brown midrib mutations and their importance to the utilization of maize, sorghum, and pearl millet lignocellulosic tissues. *Plant Science*, 178(3), 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.01.001>
- Stypinski, J. D., Weiss, W. P., Carroll, A. L., & Kononoff, P. J. (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>
- Suhartanto, B., Umami, N., Yusiati, L. M., Pangesti, A. W., & Dewanti, M. S. (2024). Forage yield, nutrient content and in vitro digestibility of Super-2 and brown midrib resistance (BMR) sorghum (*Sorghum bicolor*) varieties as forage crops. *Asian Journal of Plant Sciences*, 23, 330-337. <https://doi.org/10.3923/ajps.2024.330.337>

- Traxler, M. J., Fox, D. G., Van Soest, P. J., Pell, A. N., Lascano, C. E., Lanna, D. P. D., Moore, J. E., Lana, R. P., Vélez, M., & Flores, A. (1998). Predicting forage indigestible NDF from lignin concentration. *Journal of Animal Science*, 76(5), 1469-1480. <https://doi.org/10.2527/1998.7651469x>
- Van Soest, P. J., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent 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)
- Widodo, S., Indriatama, W. M., Anggraeny, Y. N., Sholikin, M. M., Jayanegara, A., & Wahyono, T. (2025). Forage biomass and nutrient quality in brown midrib (BMR) compared to conventional sorghum: a meta-analysis approach. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 12(1), 157-168. <https://doi.org/10.5455/javar.2025.1883>