



La interfaz suelo-planta en *Megathyrus maximus* cv. Mombasa sometida a diferentes dosis de nitrógeno en pastoreo rotacional



Caryze Cristine Cardoso Sousa ^a

Denise Baptaglin Montagner ^b

Alexandre Romeiro de Araújo ^b

Valéria Pacheco Batista Euclides ^b

Gelson dos Santos Difante ^c

Antonio Leandro Chaves Gurgel ^{c*}

Daniele Lopes de Souza ^d

^a Federal University of Grande Dourados. Dourados Mato Grosso do Sul, Brazil.

^b Embrapa Beef Cattle. Av. Radio Maia, 830. Zona Rural, 79.106-550. Campo Grande, MS, Brazil.

^c Federal University of Mato Grosso do Sul. Faculty of Veterinary Medicine and Animal Science. Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brazil.

^d Dom Bosco Catholic University. Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brazil.

* Autor de correspondencia: antoniroleandro09@gmail.com

Resumen:

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar los efectos de tres dosis de nitrógeno (N) en las características morfológicas y estructurales, la masa (MR) y la distribución de las raíces en el perfil del suelo, y la resistencia del suelo a la penetración de las pasturas de guinea Mombasa manejados con pastoreo rotacional. El diseño experimental utilizó bloques al azar con tres dosis de N (100, 200 y 300 kg ha⁻¹) y tres repeticiones. El criterio para interrumpir el rebrote de los pastos fue la altura de 80 a 90 cm del dosel (90-95 % de intercepción de luz por el dosel). Los animales fueron retirados de los potreros cuando el dosel alcanzó el 50 % de la altura prepastoreo. Se evaluó la masa y acumulación del

forraje, las características morfogénicas y estructurales del dosel, la MR y distribución en el perfil del suelo, y la resistencia del suelo a la penetración. En pastos fertilizados con 200 y 300 kg ha⁻¹ de N, se observó la mayor aparición foliar (0.090 hojas macollo⁻¹ día⁻¹ y 0.081 hojas macollo⁻¹ día⁻¹), tasas de alargamiento (2.82 y 2.61 cm macollo⁻¹ d⁻¹) y mayor acumulación diaria de forraje (113.8 y 106.6 kg ha⁻¹d⁻¹). El uso de 300 kg ha⁻¹ de N promovió una mayor resistencia del suelo a la penetración a 10 cm de profundidad en el pospastoreo (3.3 MPa). No se observó ningún efecto de las dosis de N en la MR ($P>0.05$). Por lo tanto, el control de la altura antes y después del pastoreo de los animales en los potreros ayudó a mantener la estructura del pasto y evitar el proceso de compactación del suelo. De acuerdo con los resultados, se concluye que 200 y 300 kg ha⁻¹ de fertilización con N es una estrategia para intensificar los pastos.

Palabras clave: Altura del dosel, Tasa de aparición foliar, Intercepción de luz, Masa radicular, Resistencia del suelo.

Recibido: 18/12/2020

Aceptado: 29/03/2021

Introducción

Los sistemas de pastoreo intensivo utilizan cultivares con alto potencial de producción forrajera y buen valor nutricional que requieren inversión en fertilización de mantenimiento. *Panicum maximum* (Sin. *Megathyrus maximus*) cv. Mombasa es el cultivar más utilizado debido a su alto macollaje y vigor de rebrote después del pastoreo^(1,2). Este cultivar también tiene un potencial de producción que puede superar las 27 t ha⁻¹ por año^(3,4) y alcanza valores nutricionales compatibles con ganancias individuales superiores a 700 g por animal día⁻¹⁽⁵⁾. Debido a su hábito de crecimiento y potencial productivo, este cultivar debe ser manejado utilizando pastoreo intermitente. Además, el período de descanso debe interrumpirse cuando el dosel del forraje intercepta entre el 90 % y el 95 % de la luz incidente⁽⁶⁾ y el retiro de los animales debe ocurrir cuando se haya pastoreado el 50 % del forraje^(4,7).

La fertilización con nitrógeno (N) mejora la producción de un pasto, ya que actúa directamente sobre las características morfogénicas y estructurales de la planta forrajera⁽⁸⁾. El N aumenta la aparición y las tasas de alargamiento de las hojas y reduce la vida útil de las hojas, y el filocrono aún estimula el brote de yemas axilares, aumentando la producción de macollos^(9,10). En este sentido, el estudio de la morfogénesis en pastos fertilizados permite comprender los mecanismos fisiológicos del crecimiento de las plantas, así como el papel de N como modulador, regulador y potenciador de este proceso.

Se ha realizado poca investigación sobre los efectos de N en el sistema radicular de los pastos, especialmente en los trópicos. Sin embargo, se ha demostrado que el N influye en el crecimiento de las raíces en períodos de mayor precipitación⁽¹¹⁾, lo que puede conducir a un incremento lineal de la masa radicular (MR)⁽¹²⁾. La fertilización nitrogenada aumenta la capacidad productiva de un pasto con un aumento significativo de la carga animal^(13,14), lo que puede comprometer las características físicas del suelo⁽¹⁵⁾.

Queda mucho por investigar con respecto a los efectos del pisoteo animal que resulta de la presión del pastoreo sobre los atributos físicos del suelo, incluida la compactación del suelo y la resistencia a la penetración (RP) del suelo, y el desarrollo de las raíces, ya que la longevidad de un pasto se basa en el balance químico, biológico y físico del suelo. Este último factor determina la capacidad de las raíces para desarrollarse y aprovechar los suelos para absorber agua y nutrientes.

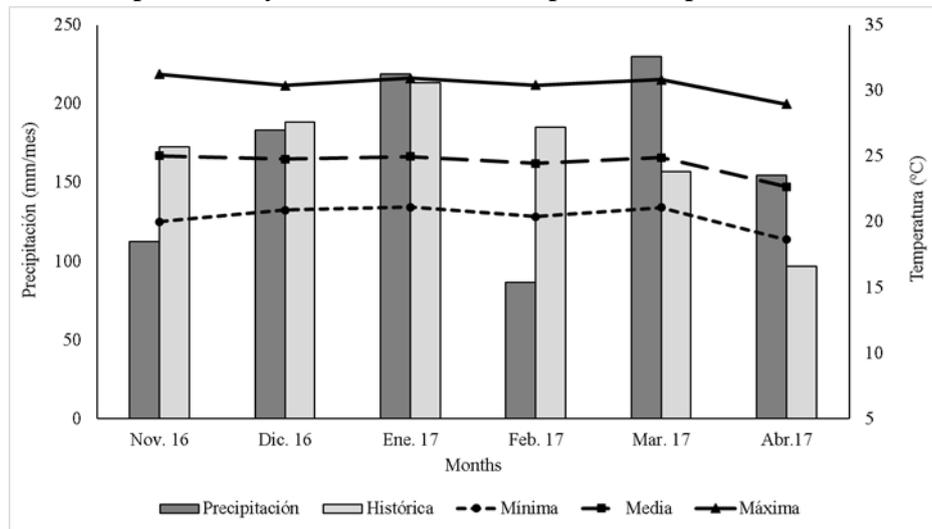
Para este trabajo se formularon las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo afecta la fertilización con N a las características morfológicas, estructurales y a la acumulación de forraje? ¿Los pastos que reciben dosis más altas de N estarán más compactados cuando el método de RP los evalúe? ¿El manejo correcto de los pastos (basado en la IL del 95 %) asociado con una intensidad de pastoreo moderada, podría reducir el efecto de compactación en el desarrollo de las raíces? En busca de respuestas, el objetivo fue evaluar los efectos de la fertilización utilizando tres dosis diferentes de N sobre las características morfológicas y estructurales, MR y distribución en el perfil del suelo, y la resistencia a la penetración del suelo de los pastos de guinea Mombasa manejados con pastoreo rotacional.

Material y métodos

Localización del experimento y monitoreo edafoclimático

El experimento se realizó en Embrapa Beef Cattle, Campo Grande, MS (20°27'S, 54°37'O y una altitud de 530 m) de noviembre de 2016 a abril de 2017. Según la clasificación de Köppen, esta región tiene un clima de sabana tropical (Aw) con una distribución estacional de las precipitaciones. La estación meteorológica de Embrapa Beef Cattle, ubicada aproximadamente a 4 km del área experimental, registró la precipitación y las temperaturas mínimas, promedio y máximas (Figura 1).

Figura 1: La precipitación promedio mensual e histórica y las temperaturas mínimas, promedio y máximas durante el período experimental



El suelo del área experimental está clasificado como Latosol Rojo y tiene un contenido arcilloso de alrededor del 30 %⁽¹⁶⁾. Antes de que iniciara el experimento, el suelo se muestreó en las capas de 0-10, 0-20 y 20-40 cm para la evaluación química (Cuadro 1). Con base en los resultados del análisis de suelo y el sistema de producción propuesto, los pastos fueron fertilizados en cobertura con 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 80 kg ha⁻¹ de K₂O en noviembre de 2016.

Cuadro 1: Características químicas del suelo del área experimental a profundidades de 0–10, 0–20 y 20–40 cm en pastos de guinea Mombasa fertilizados

Dosis (N)	Prof (cm)	pH CaCl ₂	PM g dm ⁻³	MO g dm ⁻³	K Ca Mg Ca+Mg Al H Al+H S T V									
					cmol dm ⁻³								%	
100	0–10	5.53	4.34	44.03	0.43	4.08	1.18	5.27	0.00	3.47	3.47	5.69	9.16	62.17
	0–20	5.56	3.89	42.38	0.32	4.18	1.15	5.33	0.00	3.49	3.49	5.66	9.15	61.88
	20–40	5.47	1.47	28.38	0.19	2.06	0.97	3.23	0.00	3.15	3.15	3.42	6.57	51.96
200	0–10	5.50	5.89	37.92	0.38	3.87	1.17	5.03	0.00	3.25	3.25	5.42	8.66	62.54
	0–20	5.53	4.64	37.24	0.35	3.83	1.18	5.02	0.00	3.10	3.10	5.37	8.46	63.39
	20–40	5.33	1.87	25.62	0.19	2.22	1.42	3.63	0.00	2.98	2.98	3.83	6.80	56.36
300	0–10	5.27	4.06	40.08	0.41	3.45	1.10	4.55	0.00	4.25	4.25	4.96	9.21	53.93
	0–20	5.33	3.85	39.46	0.26	3.48	1.08	4.57	0.00	3.93	3.93	4.83	8.76	55.22
	20–40	5.42	1.33	32.64	0.13	2.32	0.97	3.28	0.00	3.15	3.15	3.42	6.56	52.33

N100 = 100 kg ha⁻¹ por año de N; N200 = 200 kg ha⁻¹ por año de N; y N300 = 300 kg ha⁻¹ por año de N.

Diseño y conducción experimental

El área experimental de 13.5 ha se dividió en tres bloques de 4.5 ha cada uno; cada bloque se dividió en tres módulos de 1.5 ha y estos en seis potreros de 0.25 ha. El diseño experimental utilizó bloques completamente al azar, con tres tratamientos y tres repeticiones (módulos). Los tratamientos fueron pastos de guinea Mombasa fertilizados con dosis de 100 (N100), 200 (N200) y 300 (N300) kg ha⁻¹ de N.

La fertilización con N se dividió en dos aplicaciones para el tratamiento N100 y tres aplicaciones para los tratamientos N200 y N300. La primera dosis de N se aplicó en noviembre, junto con P y K (80 kg ha^{-1} de P_2O_5 y 80 kg de K_2O). La fuente de N utilizada fue urea, aplicada hasta finales de marzo (temporada lluviosa) y solo cuando los animales abandonaron los potreros. El método de pastoreo utilizado fue el de pastoreo rotacional con una carga animal variable (put-and-take). Se adoptaron alturas de dosel de 80 a 90 cm y de 40 a 50 cm como condiciones pre y pospastoreo⁽⁶⁾, respectivamente, para todas las dosis de N evaluadas. Cincuenta y cuatro (54) novillos cruzados de la raza Angus x Nellore, con edad y peso inicial de 10 meses y 300 kg se utilizaron para rebajar los pastos, y no se realizaron evaluaciones de rendimiento para este experimento. Los animales recibieron suplementación mineral *ad libitum*.

Variables estimadas del dosel forrajero

La altura del dosel forrajero (cm), antes y después del pastoreo, se determinó utilizando una regla graduada en 40 puntos aleatorios por potrero. La altura de cada punto correspondió a la altura del dosel alrededor de la regla, y el promedio de estos puntos representó la altura promedio del dosel en cada potrero.

Para la estimación de la masa del forraje, antes y después del pastoreo, se eligió al azar un potrero de cada módulo, y se cortaron nueve muestras de 1 m^2 cerca del nivel del suelo en cada ciclo de pastoreo⁽⁴⁾. El mismo potrero fue muestreado durante todo el período experimental. Las muestras se pesaron y se dividieron en dos submuestras: Una se secó a $65 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta un peso constante para determinar la materia seca total. La otra se subdividió manualmente en hoja (lámina de la hoja), tallo (vainas y tallo) y material muerto, se secó a $55 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta un peso constante y se pesó. El porcentaje de cada componente se determinó para estimar la relación hoja:tallo.

La tasa de acumulación de forraje se calculó utilizando la diferencia entre la masa de forraje en el prepastoreo actual y el pospastoreo anterior, considerando solo la porción verde (hoja y tallo), dividida entre el número de días entre muestras. La acumulación total de forraje durante el período experimental fue la suma de la acumulación de forraje de todos los ciclos de pastoreo.

Al comienzo de cada período de descanso del potrero, se marcaron 10 macollos en cada unidad experimental para determinar las características morfogénicas y estructurales. Los macollos se marcaron en dos potreros por módulo, totalizando 18 potreros (seis potreros por cada dosis de N evaluada). La medición de hojas y macollos individuales permitió evaluar los siguientes factores: tasa de aparición foliar (TAF; $\text{hojas macollo}^{-1} \text{ día}^{-1}$), o el número de hojas por macollo dividido entre el número de días en el período de evaluación; filocrono (días), o el inverso de TAF; tasa de alargamiento foliar (TLF; $\text{cm macollo}^{-1} \text{ d}^{-1}$), o la suma del alargamiento de la lámina de la hoja dividida entre el número de días en el período de evaluación; tasa de alargamiento del tallo (TAT; $\text{cm macollo}^{-1} \text{ d}^{-1}$), o la suma del alargamiento del tallo dividida entre el número de días en el período de

evaluación; longitud foliar final (LFF; cm macollo⁻¹), o la longitud media completamente expandida de las láminas de las hojas; tasa de senescencia foliar (TSF; cm macollo⁻¹ d⁻¹), o la relación entre la suma de las longitudes senescentes de las láminas de las hojas en el macollo y el número de días en el período de evaluación; número de hojas verdes (NHV), o el número de hojas en expansión y expandidas, sin tener en cuenta las hojas senescentes de cada macollo; vida útil de la hoja (VUH; días), o el período de tiempo desde la aparición de la hoja hasta su muerte, estimado utilizando la ecuación $VUH = NHV \times \text{Filocrono}^{(17)}$.

La densidad de población de macollos (DPM) se estimó contando los macollos en tres áreas de 1 m² (número de macollos por m²) por unidad experimental. Las ubicaciones de estos puntos se eligieron para representar la condición promedio del pasto en el momento de la evaluación. Estas áreas se mantuvieron fijas y marcadas con una estaca de madera y se cambiaron solo cuando ya no representaban la condición promedio del pasto. El conteo de macollos se realizó durante la condición previa al pastoreo.

Variables estimadas del suelo

La MR seca se evaluó recolectando ocho muestras de dos potreros de cada módulo, utilizando una barrena cilíndrica de 4.8 cm de ancho y 10 cm de alto, del 20 al 24 de marzo de 2017. Se recogieron cuatro muestras debajo de las matas y cuatro fuera de las matas. Cada muestra se submuestreó a profundidades de 0–10, 0–20, 20–30 y 30–40 cm. Las muestras de suelo húmedo + raíz se empacaron en bolsas de plástico identificadas.

Las muestras de suelo + raíz se lavaron con agua corriente utilizando tamices con cribas de 2 y 1 mm, separando el suelo de la MR. Las raíces se secaron en un horno de 60 a 65 °C durante 72 h y luego se pesaron para determinar el contenido de materia seca. Para evaluar la humedad del suelo, se recogió una muestra de suelo deformada por módulo experimental⁽¹⁸⁾. Los valores de humedad del suelo se utilizaron para ajustar los cálculos de MR seca (kg ha⁻¹) y la distribución radicular en el perfil del suelo.

La resistencia a la penetración (RP) del suelo se estimó utilizando el Falker PenetroLOG - PLG 1020 (medidor electrónico de compactación del suelo) del 15 de marzo al 17 de abril de 2017. Las evaluaciones de RP se realizaron en 10 posiciones en los dos potreros centrales de cada módulo antes y después del pastoreo. Además, el mismo día en que se completaron las evaluaciones de RP, se recolectaron muestras para determinar la humedad del suelo a profundidades de 0–15, 15–30, 30–45 y 45–60 cm para la posterior corrección de los valores de RP⁽¹⁹⁾.

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos de la masa y la tasa de acumulación de forraje se realizó utilizando un modelo matemático que contenía el efecto de bloque aleatorio y los efectos

fijos de los tratamientos, las estaciones y las interacciones entre ellos. Para todos los análisis, se utilizó el procedimiento mixto disponible en el Instituto SAS (1996). La comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey, adoptando una probabilidad del 5 %. En el caso de interacciones significativas, la comparación de medias se realizó utilizando la probabilidad de la diferencia y la prueba de Tukey al 5 %.

Los componentes principales (CP) evaluaron los datos relativos a las características morfológicas y estructurales: el conjunto de datos se estandarizó, lo que significa que cada descriptor presentó media cero y variación unitaria. Este análisis permitió reducir el espacio de las variables originales en un conjunto más pequeño, preservando el máximo de la variabilidad original de los datos. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software R versión 3.6.1.

Para MR y RP del suelo, se adoptó un diseño de bloques al azar en un arreglo de parcelas divididas. El efecto residual de las dosis de N se asignó a la parcela y las profundidades a la subparcela. Se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + D_i + B_j + \alpha_{ij} + P_k + (D*P)_{ik} + \beta_{ijk}$$

Y_{ijk}= valor observado en la dosis i, bloque j y profundidad k;

μ= efecto medio general;

D_i= efecto de la dosis i (i = 100, 200 y 300);

B_j= efecto del bloque j;

α_{ij}= efecto del error aleatorio atribuido a la parcela;

P_k= efecto de la profundidad k; (D*P)_{ik} = el efecto de la interacción entre dosis y profundidad; y

β_{ijk}= error aleatorio asignado a la subparcela.

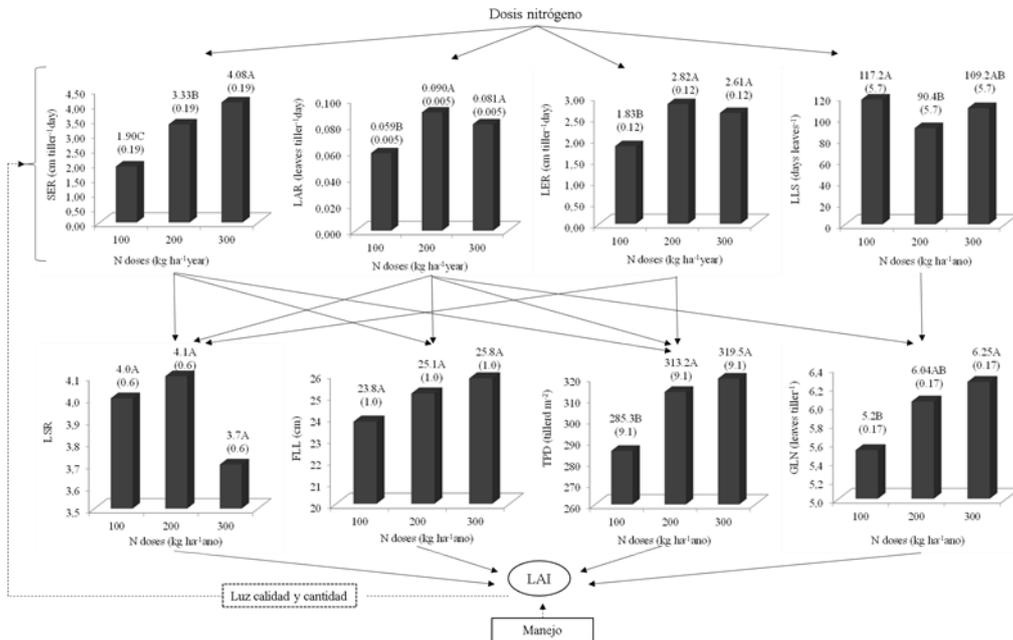
Cuando fue significativo según la prueba F, el efecto de las dosis se analizó mediante la prueba de Tukey y el efecto de las profundidades con la prueba de Scott-Knott, ambas con una probabilidad del 5 %.

Resultados

Características morfológicas y estructurales

La fertilización con N200 y N300 promovió la TAF y TLF más altas en comparación con la fertilización con N100 (Figura 2). La TSF fue alta en pastos fertilizados con N100, y fue la misma en pastos fertilizados con N200 y N300 (Cuadro 3). Además, los pastos fertilizados con N100 demostraron la TAT más baja, los pastos fertilizados con N300 la TAT más alta y los pastos fertilizados con N200 una TAT intermedia (Figura 2).

Figura 2: Las características morfogénicas y estructurales del dosel de pasto guinea Mombasa fertilizado con dosis de nitrógeno (N)



Los valores entre paréntesis indican el error estándar de la media. SER= tasa de alargamiento del tallo (TAT); LAR= tasa de aparición foliar (TAF); LER= tasa de alargamiento foliar (TLF); LLS= vida útil de la hoja (VUH); LSR= tasa de senescencia foliar (TSF); FLL= longitud foliar final (LFF); TPD= densidad de población de macollos (DPM); GLN= número de hojas verdes (NHV); LAI= Índice de área foliar (IAF).

Los pastos fertilizados con N100 también tuvieron la DPM más baja, mientras que los pastos fertilizados con N200 y N300 tuvieron la DPM más alta (Figura 2). La LFF no difirió entre las dosis de N. Los pastos que recibieron N100 revelaron el NHV por macollo más bajo, mientras que los pastos que recibieron N300 revelaron el más alto; la dosis de N200 promovió valores intermedios de NHV. La relación hoja:tallo no difirió por las dosis de N evaluadas. Finalmente, el filocrono y la TSF fueron mayores en pastos fertilizados con N100 y menores en pastos fertilizados con N200 o N300 (Cuadro 2).

Cuadro 2: Promedios de filocrono y tasa de senescencia foliar (TSF) en los pastos de guinea Mombasa fertilizados con dosis de N

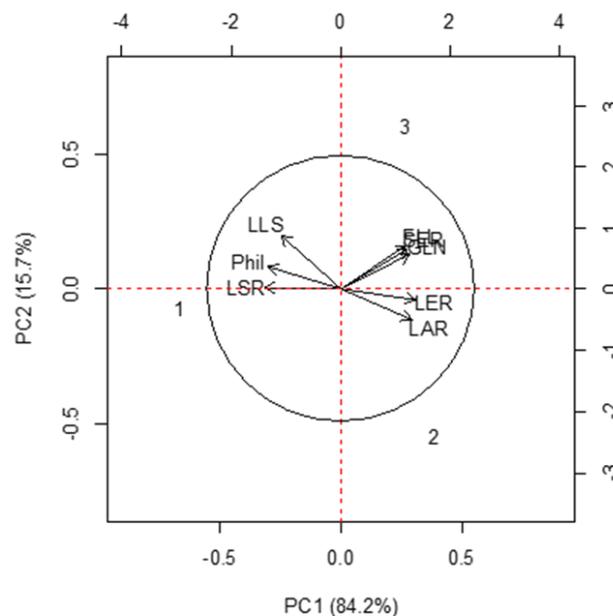
Variables	Dosis de N (kg ha ⁻¹)			Valor-P
	100	200	300	
Filocrono, días	18.6 ^a	11.3 ^b	12.9 ^b	0.0001
TSF, cm macollo ⁻¹ día ⁻¹	1.09 ^a	0.72 ^b	0.73 ^b	0.0001

Letras minúsculas distintas en la misma fila difieren según la prueba de Tukey ($P > 0.05$).

El análisis de CP indicó que sólo dos CP explicaron el 99 % de la variación en el conjunto de datos. El primer CP explicó el 84.2 % de la variación total de los datos y aspectos relacionados con la aparición de los tejidos (Figura 3). En este CP, la TAF se asoció positivamente con la LFF, la TLF, el NHV y la TAT y se asoció negativamente con el filocrono, la VUH y la TSF. Además, la TAF, la LFF, la TLF, el NHV y la TAT indicaron

una alta asociación con las dosis de N200 y N300. En el segundo CP, que explicó el 15.7 % de la variación de los datos, se observó una asociación positiva entre el filocrono, la VUH, el NHV, la LFF y la TAT y una asociación negativa entre estas variables y la TAF y la TLF. En este CP, el filocrono, la VUH, NHV, LFF y la TAT se asociaron con la dosis de N300 y la TAF y la TLF con la dosis de N200. La TSF demostró neutralidad por dosis de N.

Figura 3: Biplot del primer componente principal (eje x) y del segundo componente principal (eje y)



FLL= longitud foliar final (LFF); Phil= filocrono; LAR= tasa de aparición foliar (TAF); LER= tasa de alargamiento foliar (TLF); GLN= número de hojas verdes por macollo (NHV); LSR= tasa de senescencia foliar (TSF); LLS= vida útil de la hoja (VUH); SER= tasa de alargamiento del tallo (TAT).

Altura del dosel, masa y tasa de acumulación de forraje

Las alturas pre y postpastoreo se aproximaron a los objetivos predeterminados para las tres dosis de N evaluadas. Los promedios de altura fueron de 81.6 (\pm 1.61) cm en la condición prepastoreo y de 44.7 (\pm 1.21) cm en la condición postpastoreo (cuando los animales abandonaron los potreros).

Los pastos de guinea Mombasa fertilizados con N300 revelaron la tasa diaria de acumulación de forraje más alta (Cuadro 3) y los períodos de pastoreo y descanso más cortos, mientras que los pastos fertilizados con N100 revelaron los períodos de pastoreo y descanso más largos. Los fertilizados con N200 presentaron valores intermedios.

Cuadro 3: La tasa de acumulación de forraje; alturas pre y pospastoreo; y promedios de los períodos de pastoreo y descanso en pastos de guinea Mombasa fertilizados

Variables	Dosis de N (kg ha ⁻¹)			Valor- <i>P</i>
	100	200	300	
Período de pastoreo, días	6.5 (0.16) ^a	5.6 (0.16) ^{ab}	5.1 (0.14) ^b	0.0001
Período de descanso, días	30.9 (0.88) ^a	27.5 (0.84) ^b	24.6 (0.82) ^c	0.0001
TAF, kg ha ⁻¹ día ⁻¹	86.2 (3.1) ^c	106.6 (3.8) ^b	113.8 (3.5) ^a	0.0001

TAF= Tasa de acumulación de forraje.

^{abc} Letras minúsculas distintas en la misma fila difieren ($P < 0.05$); los valores entre paréntesis son el error estándar de la media.

La masa del forraje ($5,670 \pm 121$ kg ha⁻¹); hoja (67.9 ± 2.1 %), tallo (17.3 ± 1.3 %), y material muerto (14.8 ± 1.1 %); y relación hoja:tallo (3.9 ± 0.6) no difirieron entre las dosis de N en el prepastoreo. Las dosis de N tampoco afectaron a la masa del forraje y a los porcentajes de hoja, tallo y material muerto en el pospastoreo, con valores medios y sus errores estándar de: $3,544 \pm 109$ kg ha⁻¹, 67.9 ± 2.1 %, 31.1 ± 1.7 , 41.5 ± 3.5 %, para masa del forraje, hoja, tallo y material muerto, respectivamente.

Resistencia mecánica a la penetración del suelo y la masa radicular

No se produjo interacción entre las dosis de N y las profundidades del suelo ($P=0.1397$) para la RP mecánica del suelo. Además, las dosis de N no tuvieron efecto en la RP ($P=0.4693$), con un promedio de 2.2 ± 0.16 MPa. Sin embargo, en el prepastoreo, se produjo un efecto de profundidad del suelo ($P=0.0001$) en la PR. La RP más alta se observó en la capa de 10 cm (2.77 ± 0.06 MPa), seguida de las capas de 5-20 cm. Se observaron RP más bajas a mayor profundidad del suelo.

En el pospastoreo, se produjo una interacción entre las dosis de N y las profundidades del suelo ($P= 0.0001$) para la RP (Cuadro 4). Hasta 10 cm de profundidad, se observó una mayor RP en pastos fertilizados con N300 en comparación con los fertilizados con N100 y N200. En la capa de 15 cm, la RP no difirió por las dosis de N. Por el contrario, en las capas de 20-35 cm, la RP fue mayor en los pastos fertilizados con N300 y menor en los pastos fertilizados con N200; los fertilizados con N100 no fueron afectados. Después de 40 cm de profundidad, no se observaron diferencias en la RP entre los niveles de N.

Cuadro 4: Resistencia mecánica a la penetración (MPa) del suelo sometido a diferentes dosis de nitrógeno (N) en pastos de guinea Mombasa durante el pospastoreo

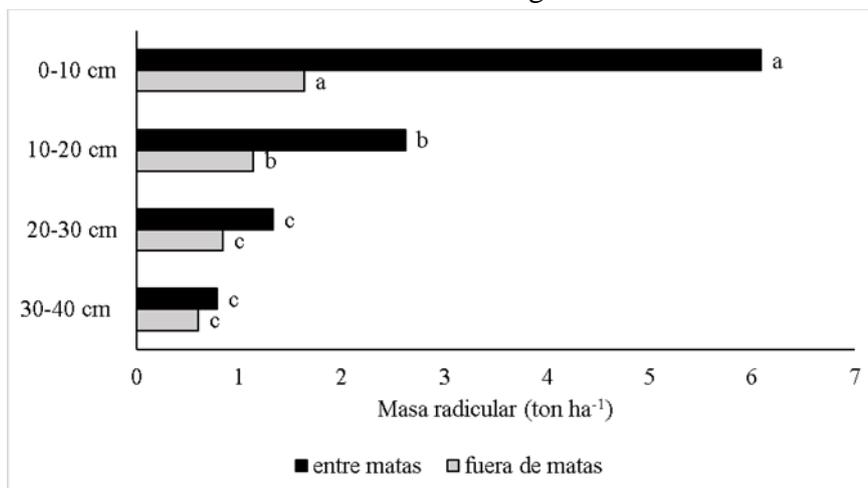
Profundidad (cm)	Dosis de N (kg ha ⁻¹)		
	100	200	300
5	2.5 ^{ba}	2.5 ^{ba}	3.4 ^{aA}
10	2.7 ^{ba}	2.7 ^{ba}	3.3 ^{aA}
15	2.2 ^{aB}	2.2 ^{aB}	2.7 ^{aB}
20	2.5 ^{abA}	2.1 ^{bb}	2.9 ^{aB}
25	2.4 ^{abB}	1.9 ^{bc}	2.6 ^{aB}
30	2.2 ^{abB}	1.7 ^{bc}	2.4 ^{aC}
35	2.1 ^{abB}	1.6 ^{bd}	2.2 ^{aD}
40	1.9 ^{aC}	1.6 ^{aD}	2.0 ^{aD}
45	1.8 ^{aC}	1.5 ^{aD}	1.8 ^{aE}
50	1.6 ^{aD}	1.5 ^{aD}	1.7 ^{aE}
55	1.6 ^{aD}	1.4 ^{aD}	1.6 ^{aE}
60	1.5 ^{aD}	1.4 ^{aD}	1.5 ^{aE}

^{ab} Promedios seguidos de letras minúsculas distintas en la misma fila difieren ($P < 0.05$).

^{AB} Letras mayúsculas distintas en la misma columna difieren ($P < 0.05$).

Error estándar de la media = 0.102.

No se produjo ningún efecto de interacción entre las dosis de N y las profundidades del suelo para las MR ($P > 0.05$). Además, no se observó ningún efecto de la dosis de N para las MR bajo (2.70 ± 0.595 t/ha de MS) o fuera (1.05 ± 0.230 t/ha de MS) de las matas ($P > 0.05$), que difirieron por las capas muestreadas (Figura 4). Las MR más grandes se observaron en la capa de 0-10 cm, seguidas por la capa de 10-20 cm; las capas de 20-30 y 30-40 cm tuvieron las MR más bajas, sin diferencias entre ellas. La suma de todas las capas muestreadas reveló 10.82 t ha⁻¹ de MS de raíz en el espacio debajo y 4.22 t/ha de MS de raíz fuera de las matas.

Figura 4: Masa radicular dentro y entre las matas de pasto guinea Mombasa fertilizados con dosis de nitrógeno

^{ab} Letras diferentes comparan profundidades en la misma posición según la mata.

Discusión

La fertilización nitrogenada influye en las características morfogénicas y estructurales del dosel del pasto guinea Mombasa^(9,10,20). De hecho, se han observado diferentes respuestas a las dosis de N utilizadas. Por ejemplo, las dosis altas de N condujeron a aumentos en TAF y TLF^(9,10,21). El nitrógeno también estimula un efecto sistemático sobre el crecimiento de las hojas: a medida que aumenta la nutrición N, la TAF también aumenta. Además, el N aumenta la producción celular en las hojas en crecimiento, alterando la división celular y las tasas de expansión⁽²²⁾ y afectando así a la TLF. Por lo tanto, los pastos fertilizados con N100 tuvieron un alargamiento foliar más prolongado debido a su menor suministro de este nutriente.

A medida que N se vuelve más disponible para una planta, su TLF aumenta, aumentando su tamaño final de hoja y, en última instancia, disminuyendo su vida útil⁽²³⁾. Los pastos de guinea Mombasa que recibieron dosis más altas de N (200 y 300 kg ha⁻¹) alcanzaron el objetivo prepastoreo de 80-90 cm más rápidamente que aquellos que recibieron una dosis de N más baja (100 kg ha⁻¹) debido a su filocrono más corto, o el tiempo necesario para que aparezcan dos hojas consecutivas. Las dosis de N más altas pueden haber favorecido la recuperación del aparato fotosintético de las hojas de los pastos guinea Mombasa poco después de la defoliación, reduciendo el filocrono y el tiempo que los pastos necesitaban para recuperarse.

Las reducciones en la VUH debido a la fertilización con N requirieron ajustar las prácticas de manejo del pastoreo para cosechar el forraje en el momento apropiado, lo que la evolución de la TAF, la TLF y la TSF puede determinar. Los diferentes períodos de pastoreo y descanso de los pastos resultaron de ajustar el manejo del pastoreo para lograr la condición adecuada de uso del forraje.

El uso de N en las estrategias de fertilización favorece el crecimiento y la tasa de acumulación de forraje al aumentar las tasas de reacciones enzimáticas y el metabolismo de las plantas forrajeras⁽²³⁾. A medida que aumenta la acumulación de forraje, también aumenta el índice de área foliar, promoviendo el sombreado de hojas y macollos en la base del pasto⁽²⁴⁾. En su búsqueda de luz, los tallos se alargan, y las hojas más jóvenes y fotosintéticamente eficientes se exponen en la parte superior del dosel^(20,25,26). El manejo del pastoreo con control de la condición del pasto permitió la cosecha de forraje cuando el número de tallos no dañó la estructura del dosel, ya que no se produjo ninguna variación entre los porcentajes de hoja y tallo en el prepastoreo, incluso con diferencias en la TAF, la TAT y la LFF (Figura 2) por las dosis de N evaluadas.

Dado que las características morfogénicas del dosel influyen en sus características estructurales⁽²⁷⁾, se observaron los efectos de las diferentes dosis de N en la mayoría de las variables estructurales. La TAF determina directamente la DPM, ya que cada nueva hoja que emerge representa un fitómero, que está formado por la lámina de la hoja, la

lígula, la vaina, el nudo, el entrenudo, las yemas axilares y las raíces⁽²⁸⁾. Cada fitómero puede generar un nuevo macollo, cuya aparición está regulada por la cantidad y calidad de la luz que llega a la base del dosel⁽²⁹⁾. El mayor número de macollos es, por lo tanto, responsable de la mayor producción de forraje, observada en pastos fertilizados con las dosis más altas de N. Por el contrario, el manejo del pastoreo determina la apertura o el cierre del dosel, lo que influye en las tasas de aparición y mortalidad de macollos⁽²⁵⁾.

Mientras que las hojas verdes por macollo es una variable determinada genéticamente, se observaron 0.73 hojas adicionales macollo⁻¹ en pastos fertilizados con N300 y 0.52 hojas macollo⁻¹ en pastos fertilizados con N200 en comparación con los que recibieron N100. Debido al efecto de N sobre la TAF, el NHV también aumentó⁽³⁰⁾, expresando el máximo potencial genético de la planta.

La LFF y la relación hoja:tallo responden a la intensidad de la defoliación y pueden clasificarse como mecanismos morfológicos de escape que las plantas presentan en respuesta a la defoliación⁽²⁹⁾. En este experimento, se utilizaron las mismas alturas pre y postpastoreo para todas las dosis de N aplicadas, lo que determinó la misma intensidad de pastoreo, representada por el 50 % de utilización de la altura prepastoreo. Esta intensidad de pastoreo se considera moderada⁽⁷⁾ y puede haber contribuido a que la longitud de las hojas no difiera según las dosis de N utilizadas.

Durante el período vegetativo, la demanda de N tiende a asociarse linealmente con la TLF, de modo que la absorción de N de lujo ocurre solo después de que una hoja se ha expandido completamente y se origina predominantemente a través de la translocación de las hojas inferiores del dosel⁽³¹⁾. Las fertilizaciones con 200 y 300 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N tuvieron más probabilidades de satisfacer la demanda de nutrientes y promovieron mayores velocidades de aparición y alargamiento de la forma y los órganos de la planta hasta que se alcanzó la frecuencia de pastoreo determinada por la altura. La fertilización con N de gramíneas tropicales aumenta la acumulación de forraje^(32,33,34). Por lo tanto, es esencial ajustar la carga animal por cada dosis de N aplicada para permitir que los animales de pastoreo consuman el forraje producido.

Además de la carga animal, los períodos de pastoreo y descanso difirieron por las dosis de N, lo que refleja las diferentes tasas de crecimiento del forraje debido a la disponibilidad de N para las plantas. Los pastos que recibieron la dosis más baja de N (100 kg ha⁻¹ año⁻¹) necesitaron 6.3 días más de descanso que aquellos que recibieron la dosis más alta de N (300 kg) y 3.4 más que los que recibieron la dosis intermedia de N (200 kg).

Se realizaron ajustes en el manejo del pastoreo para mantener las alturas objetivo pre y postpastoreo, independientemente de la dosis de N aplicada; por lo tanto, la masa del forraje y el porcentaje de los componentes del pasto fueron similares para las tres dosis de N aplicadas. La intensidad del pastoreo se controló satisfactoriamente, manteniendo la condición de dosel. Por el contrario, la diferente acumulación de forraje para las tres dosis

de N determinó la frecuencia de pastoreo, reflejándose en los períodos de descanso. El control de altura pre y pospastoreo permitió aprovechar el aumento de la acumulación de biomasa que proporciona la fertilización con N.

La dosis más alta de N ($300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) produjo la mayor acumulación de forraje, con períodos de pastoreo y descanso más cortos para los pastos. Por lo tanto, una mayor acumulación de forraje demandó una mayor carga animal para que se pudiera alcanzar el objetivo pospastoreo (40-50 cm), lo que se reflejó en el aumento de la presión de pastoreo.

Los aumentos de la carga animal y la presión de pastoreo que resultan de la intensificación (fertilización con N) están fuertemente relacionados con la compactación del suelo en pastos^(35,36) debido a la presión que ejercen los cascos de los animales. La intensidad de esta presión depende de la masa corporal, el área de las pezuñas y la energía cinética ejercida sobre los suelos⁽¹⁵⁾, aumentando la densidad del suelo debido a las cargas y la presión aplicada. La RP está directamente relacionada con la carga animal⁽³⁷⁾, que fue un factor determinante en el aumento de la RP en los pastos que recibieron N300 en el período pospastoreo. En particular, en las capas superficiales del suelo (0-10 cm), se concentra la mayoría de las raíces del pasto^(38,39). Por lo tanto, una RP superior a 2.5 MPa a estas profundidades puede limitar el desarrollo de las raíces^(37,40).

Aunque los pastos que recibieron N300 indicaron valores de RP superiores a 2.5 MPa en las capas de 0–10 cm de profundidad en el período pospastoreo, la carga animal que proporcionaron las diferentes fertilizaciones con N no parece haber afectado a la MR. Este hallazgo indica que el método de pastoreo intermitente que utiliza la técnica de put-and-take, que implica el uso de un número variable de animales para el ajuste de la carga⁽⁴¹⁾, podría controlar eficientemente la presión de pastoreo, manteniéndola dentro de lo que se considera ideal.

Además, los pastos demostraron un excelente vigor de rebrote y una alta acumulación de forraje a pesar de los valores de RP que podrían estar impidiendo el desarrollo de los pastos. La compactación reduce los poros del suelo cuando los poros más grandes se pierden o reducen de tamaño⁽⁴²⁾; sin embargo, los pastos parecen ajustar el diámetro de sus raíces para llenar espacios porosos en su búsqueda de agua y nutrientes⁽⁴³⁾. Por lo tanto, el alargamiento de las raíces durante esta búsqueda parece tener una función de desempaque del suelo durante el rebrote de los pastos, lo que justifica la ausencia del efecto de N en la RP del suelo en el período prepastoreo.

Si bien algunas investigaciones sugieren que se produce una reducción en la MR de los pastos forrajeros debido al aumento de las dosis de N, incluso en períodos con mayor precipitación^(11,44), esta investigación determinó que el criterio de manejo adoptado (alturas de 80–90 cm prepastoreo y 40–50 cm pospastoreo) podría garantizar el rebrote y el mantenimiento de la acumulación de forraje sin comprometer el sistema radicular. De hecho, el índice de área foliar restante (después del pastoreo) tiene una relación importante con la MR, de modo que intensidades de defoliación más severas pueden

reducir la MR y el crecimiento^(12,45). En este experimento, la intensidad de la defoliación se consideró moderada (se eliminó el 50 % de la parte aérea de la planta) y dentro de los límites de resistencia al pastoreo considerados ideales para el uso de la planta⁽⁴⁶⁾, lo que significa que el índice de área foliar restante podría garantizar el restablecimiento completo de las partes aéreas y radicales de la planta.

Conclusiones e implicaciones

La fertilización nitrogenada influye en el crecimiento de los pastos de guinea Mombasa, así como en sus características morfológicas y estructurales. Tales cambios afectan la resistencia a la penetración de las raíces al suelo, lo que puede promover la compactación del suelo si el manejo del pastoreo no se controla estratégicamente. El control de altura pre y pospastoreo es una alternativa de manejo que permite no solo mantener la estructura del dosel, sino también evitar el proceso de compactación, preservando la materia seca de las raíces en el suelo, independientemente del nivel de intensificación.

Agradecimientos

A la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES, por sus siglas en portugués) por el incentivo financiero – Código de Financiamiento 001. El apoyo de la Universidad Federal de Grande Dourados (UFGD), el Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) y la Embrapa Gado de Corte.

Literatura citada:

1. Veras ELL, Difante, GS, Gurgel ALC, Costa ABG, Rodrigues JGR, Costa CM, *et al.* Tilling and structural characteristics of *Panicum* cultivars in the Brazilian Semiarid Region. *Sustainability* 2020;12(9):3849.
2. Montagner DB, Nascimento Júnior D, Vilela HH, Sousa BML, Euclides VPB, Silva SC, *et al.* Tilling dynamics in pastures of guinea grass subjected to grazing severities under intermittent stocking. *R Bras Zootec* 2012;41(3):544-549.
3. Da Silva SC, Bueno AAO, Carnevalli RA, Uebele MC, Bueno FO, Hodgson J, *et al.* Sward structural characteristics and herbage accumulation of *Panicum maximum* cv. Mombasa subjected to rotational stocking managements. *Sci Agric* 2009;66(1):8-19.
4. Euclides VPB, Carpejani GC, Montagner DB, Nascimento Junior D, Barbosa RA, Difante GS. Maintaining post-grazing sward height of *Panicum maximum* (cv. Mombasa) at 50 cm led to higher animal performance compared with post-grazing height of 30 cm. *Grass Forage Sci* 2018;73(1):174-182.
5. Escarela CM, Pietroski M, Prado RM, Campos CSN, Caione G. Effect of nitrogen fertilization on productivity and quality of Mombasa forage (*Megathyrus maximum* cv. Mombasa). *Acta Agron* 2017;66(1):42-48.

6. Alvarenga CAF, Euclides VPB, Montagner DB, Sbrissia AF, Barbosa RA, Araújo AR. Animal performance and sward characteristics of Mombasa guineagrass pastures subjected to two grazing frequencies. *Trop Grassl-Forrajes Trop* 2020; 8(1):1-10.
7. Fonseca L, Carvalho PCF, Mezzalira JC, Bremm C, Galli JR, Gregorini P. Effect of sward surface height and level of herbage depletion on bite features of cattle grazing *Sorghum bicolor* swards. *J Anim Sci* 2013;91(9):4357-4365.
8. Cruz P, Boval M. Effect of nitrogen on some morphogenetic traits of temperate and tropical perennial forage grasses. In: Lemaire G, *et al*, editors. *Grassland ecophysiology and grazing ecology*. 1st ed. Wallingford, UK: CABI Publishing; 2000:151-168.
9. Braz TGS, Fonseca DM, Freitas FP, Martuscello JA, Santos MER, Santos MV. *et al*. Morphogenesis of Tanzania guinea grass under nitrogen doses and plant densities. *R Bras Zootec* 2011;40(7):1420-1427.
10. Martuscello JA, Silva LP, Cunha DNFV, Batista ACS, Braz TGS, Ferreira PS. Adubação nitrogenada em capim-massai: Morfogênese e produção. *Cienc Anim Bras* 2015;16(1):1-13.
11. Giacomini AA, Mattos WT, Mattos HM, Werner JC, Cunha EA, Carvalho DD. Crescimento de raízes dos capins aruana e tanzânia submetidos a duas doses de nitrogênio. *R Bras Zootec* 2005;34(4):1109-1120.
12. Gomide CAM, Paciullo DSC, Morenz MJF, Costa IA, Lanzoni CL. Productive and morphophysiological responses of *Panicum maximum* Jacq. cv. BRS Zuri to timing and doses of nitrogen application and defoliation intensity. *Grassl Sci* 2019; 65(2):93-100.
12. Costa MAT, Tormena CA, Lugão SMB, Fidalski J, Nascimento WG, Medeiros FM. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação de pastejo. *R Bras Ci Solo* 2012;36(1):993-1004.
14. Barbosa LF. Acúmulo de forragem e desempenho animal em pastos de capim-mombasa sob doses de nitrogênio e pastejo intermitente [tesis maestría]. Brasil, MS: Universidade Federal da Grande Dourados; 2018.
15. Greenwood KL, McKenzie BM. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Aust J Exp Agric* 2001;41(8):1231-1250.
16. EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3th ed. Rio de Janeiro, Brasil: Centro Nacional de Pesquisa de solo; 2013.

17. Lemaire G, Chapman D. Tissue flows in grazed plant communities. In: Hodgson J, Illius AW, editors. The ecology and management of grazing systems. 1st ed. Wallingford, UK: CABI Publishing; 1996:3-29.
18. EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. 3th ed. Rio de Janeiro, Brasil: Centro Nacional de Pesquisa de solo; 2017.
19. Busscher WJ, Bauer PJ, Campa CR, Sojka RE. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Res* 1997;43(3-4):205–217.
20. Basso KC, Cecato U, Lugão SMB, Gomes JAN, Barbero LM, Mourão GB, *et al.* Morfogênese e dinâmica do perfilhamento em pastos de *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio submetido a doses de nitrogênio. *Rev Bras Saúde Prod An* 2010; 11(4):976-989.
21. Farias LN, Zanine AM, Ferreira DJ, Ribeiro MD, Souza AL, Geron LJV, *et al.* Effects of nitrogen fertilization and seasons on the morphogenetic and structural characteristics of Piatã (*Brachiaria brizantha*) grass. *Rev Fac Cienc Agrar* 2019; 51(2):42-54.
22. Gastal F, Lemaire GN. Uptake and distribution in crops: An agronomical and ecophysiological perspective. *J Exp Bot* 2002;53(370):789-799.
23. Vitor CMT, Fonseca DM, Cóser AC, Martins CE, Nascimento Júnior D, Ribeiro Júnior JI. Produção de matéria seca e valor nutritivo de pastagem de capim-elefante sob irrigação e adubação nitrogenada. *R Bras Zootec* 2009;41(3):565-573.
24. Brougham RW. Effect of intensity of defoliation on regrowth of pasture. *Aust J Agric Res* 1956;7(5):377-387.
25. Difante GDS, Nascimento Júnior D, Silva SC, Euclides VPB, Zanine AM, Adese B. Tillering dynamics of marandu palisadegrass submitted to two cutting heights and three cutting intervals. *R Bras Zootec* 2008;37(2):189-196.
26. Pereira LET, Paiva AJ, Geremia EV, Silva SC. Components of herbage accumulation in elephant grass cvar Napier subjected to strategies of intermittent stocking management. *J Agric Sci* 2014;152(6):954-966.
27. Difante GS, Nascimento Júnior D, Silva SC, Euclides VPB, Montagner DB, Silveira MCT, *et al.* Características morfogênicas e estruturais do capim-marandu submetido a combinações de alturas e intervalos de corte. *R Bras Zootec* 2011;40(5):955-963.
28. Nelson CJ. Shoot morphological plasticity of grasses: leaf growth vs. tillering. In: Hodgson J, Illius AW, editors. The ecology and management of grazing systems. 1st ed. Wallingford, UK: CABI Publishing; 1996:101-126.

29. Gastal F, Lemaire G. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: review of the underlying ecophysiological processes. *Agriculture* 2015;5(4):1146-1171.
30. Garcez Neto AF, Nascimento Junior D, Regazzi AJ, Fonseca DM, Mosquim PR, Gobbi KF. Respostas morfológicas e estruturais de *Panicum maximum* cv. Mombasa sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e alturas de corte. *R Bras Zootec* 2002; 31(5):1890-1900.
31. Lemaire G, Oosterom EV, Sheehy J, Jeuffroy MH, Massignam A, Rossato L. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth? *Field Crops Res* 2007;100(1):91-106.
32. Alderman PD, Boote KJ, Sollenberger LE. Regrowth dynamics of “tifton 85” bermudagrass as affected by nitrogen fertilization. *Crop Sci* 2011;51(4):1716-1726.
33. Fagundes JL, Moreira AL, Freitas AWP, Augusto Zonta I; Henrichs R, Rocha FC, *et al.* Capacidade de suporte de pastagens de capim-tifton 85 adubado com nitrogênio manejadas em lotação contínua com ovinos. *R Bras Zootec* 2011;40(12):2651-2657.
34. Carvalho RM, Alves LC, PHM Rodrigues PHM, Souza WD, Ávila AB, Santos MER. Acúmulo de forragem e estrutura do dossel de Capim-Marandu diferido e adubado com nitrogênio. *Bol Ind Anim* 2017;74(1):1-8.
35. Bertol I, Almeida JA, Almeida EX, Kurtz C. Propriedades físicas do solo relacionadas a diferentes níveis de oferta de forragem de capim-elefante-anão cv. Mott. *Pesq Agropec Bras* 2000;35(5):1047-1054.
36. Leão TP, Silva AP, Macedo MCM, Imhoff S, Euclides VPB. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil Tillage Res* 2006;88(1-2):279-285.
37. Leão TP, Silva AP, Macedo MCM, Imhoff S, Euclides VPB. Least limiting water range in the evaluation of continuous and short-duration grazing systems. *R Bras Ci Solo* 2004;28(3):415-422.
38. Beloni T, Piotto VC, Mari GC, Pinheiro AA, Tormena CA, Cecato U. Root system and resistance to penetration of Mombaça grass fertilized with nitrogen and irrigated. *Semin Cienc Agrar* 2016;37(5):3243-3252.
39. Gurgel ALC, Difante GS, Araujo AR, Montagner DB, Euclides VPB, Silva MGP. Carbon and nitrogen stocks and soil quality in an area cultivated with guinea grass under the residual effect of nitrogen doses. *Sustainability* 2020;12(22):3849.
40. Imhoff S, Silva AP, Tormena CA. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesq Agropec Bras* 2000;35(7):1493-1500.

41. Allen VG, Batello C, Berretta EJ, Hodgson J, Kothmann M, Li X, *et al.* An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass Forage Sci* 2011;66(1):2–28.
42. Dexter AR. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 2004;120(3-4):201–214.
43. Huot C, Zhou Y, Philp JNM, Denton MD. Root depth development in tropical perennial forage grasses is related to root angle, root diameter and leaf area. *Plant Soil* 2020;456(1-2):145-158.
44. Sarmento P, Rodrigues LRA, Lugão SMB, Cruz MCP, Campos FP, Ferreira ME, *et al.* Sistema radicular do *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio adubado com nitrogênio e submetido à lotação rotacionada. *R Bras Zootec* 2008;37(1):27-34.
45. Guo YJ, Han L, Li GD, Han JG, Wang GL, Li ZY, *et al.* The effects of defoliation on plant community, root biomass and nutrient allocation and soil chemical properties on semi-arid steppes in northern China. *J Arid Environ* 2012;(78):128-134.
46. Da Silva S, Sbrissia A, Pereira L. Ecophysiology of C4 forage grasses-understanding plant growth for optimizing their use and management. *Agriculture* 2015;5(3):598-625.