

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Parametrização do modelo APSIM-*Tropical Pasture* para a simulação de  
crescimento de *Megathyrus maximus* cv. Mombaça**

**Tibério Sousa Feitosa**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Ciências. Área de concentração: Ciência Animal e  
Pastagens

**Piracicaba  
2021**

**Tibério Sousa Feitosa**  
**Zootecnista**

**Parametrização do modelo *APSIM-Tropical Pasture* para a simulação de crescimento de  
*Megathyrus maximus* cv. Mombaça**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:  
Profa. Dra. **PATRÍCIA MENEZES SANTOS**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Ciências. Área de concentração: Ciência Animal e  
Pastagens

**Piracicaba**  
**2021**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Feitosa, Tibério Sousa

Parametrização do modelo *APSIM-Tropical Pasture* para a simulação de crescimento de *Megathyrus maximus* cv. Mombaça / Tibério Sousa Feitosa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

51 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Forragem 2. Manejo sob corte 3. Modelagem 4. Gramínea tropical I. Título

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pelas pessoas que Ele colocou em meu caminho.

Aos meus pais, Maria Ivonete Sousa Feitosa e Vicente Souto Feitosa Júnior, pelo amor incondicional, ensinamentos e apoio.

Aos meus irmãos, Alan, Alex e Edith pela apoio e palavras de incentivo.

À Prof. Dr. Patrícia Menezes Santos pela orientação e contribuição na minha formação profissional e pessoal. Também sou grato pelos valiosos ensinamentos, conselhos, paciência e amizade.

Ao Dr. Cristiam por todos os ensinamentos, paciência e contribuição no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores e todos os profissionais que contribuíram com minha formação: Dr. Carla Bittar, Dr. Carlos Pedreira, Dr. Sila Carneiro, Dr. Fabio Marin, Dr. José Pezzopane, Dr. José Cyrino, Dr. Marina Chiavegato, Dr. Durval Dourado Neto.

Aos amigos, Mariely Santos, Lucas Balcão, Henrique Bauab e Tarcio, sou grato pela troca de experiência, ajuda inestimável em vários momentos ao longo desses anos e amizade.

Ao Prof. Dr. Fernando Mendonça pela oportunidade que tive de conviver com sua equipe de pesquisa, e agradeço em especial à Débora Pantojo, Danielle Moraes e Elizabeth Carnevskis pela troca de experiência e amizade.

A todos os alunos da Pós-graduação com quem tive o prazer de conviver e compartilhar essa caminhada.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em especial ao Departamento de Zootecnia e à Embrapa Pecuária Sudeste pelo treinamento que recebi durante todos esses anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo concedida.

A todos que de alguma forma contribuíram com minha formação e com este trabalho.

Muito Obrigado!

## SUMÁRIO

RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
1. INTRODUÇÃO .....	9
1.1. Hipóteses .....	10
1.2. Objetivos gerais .....	10
1.2.1. Objetivos específicos .....	10
Referências .....	11
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	13
2.1. Uso de modelos matemáticos na simulação de crescimento e produtividade de plantas forrageiras tropicais .....	13
2.2. Tipos de modelos .....	13
2.3. Modelagem de simulação da produtividade .....	14
2.4. Modelos mecanísticos .....	14
Referências .....	16
3. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM-TROPICAL PASTURE PARA A SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO DE <i>Megathyrus maximus</i> cv. MOMBAÇA SOB CORTE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SUPRIMENTO DE NITROGÊNIO .....	19
Resumo .....	19
Abstract .....	19
3.1. Introdução .....	20
3.2. Material e métodos .....	22
3.2.1. Descrição do modelo .....	22
3.2.2. Calibração do modelo .....	22
3.2.3. Calibração de parâmetros .....	25
3.2.4. Teste de validação .....	27
3.2.5. Análise do desempenho do modelo .....	30
3.3. Resultados .....	31
3.3.1. Calibração do APSIM-Tropical Pasture .....	31
3.3.2. Teste de validação do modelo .....	42
3.4. Discussão .....	46

3.5. Conclusão .....	49
Referências .....	49

## RESUMO

### **Parametrização do modelo APSIM-Tropical Pasture para a simulação de crescimento de *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça**

Modelos mecanísticos de simulação de crescimento podem auxiliar na síntese e aplicação de conhecimento, bem como ferramentas de tomada de decisão em sistemas agrícolas tropicais. O APSIM-Tropical Pasture é um modelo mecanístico de simulação de crescimento de pastagens tropicais e que pode ser utilizado como uma ferramenta eficiente para descrever os processos em pastagens tropicais. Contudo, ainda é necessário avaliar o modelo para outras espécies tropicais, como a *Megathyrsus maximus* e em condições subótimas, por meio de estudos de calibração e teste do modelo em condições de estresse severo de N. Assim será possível melhorar a performance do modelo na estimativa de crescimento de forrageiras tropicais em uma ampla faixa de condições ambientais. Objetivou-se com esse estudo calibrar e testar o modelo APSIM-Tropical Pasture para simulação do crescimento e produtividade de *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça sob diferentes condições de disponibilidade hídrica e suprimento de N. Na calibração foram utilizados dados de experimentos de campo com capim-mombaça conduzidos em São Carlos/SP, manejado sob corte em condição irrigada e em sequeiro. Foram realizadas colheitas de massa de forragem (acima de 30 cm) e de massa de resíduo (abaixo de 30 cm até o nível do solo), em quatro frequências de corte (250, 500, 750 e 1000 graus-dia), totalizando 19 ciclos de rebrotação (2010-2012). Para a validação do modelo, foram utilizados dois experimentos independentes, um conduzido entre 2015 e 2016 em Lavras/MG e outro em Sinop/MT, cada um com 11 ciclos. Nesses experimentos, as colheitas de massa de forragem foram feitas acima e abaixo do resíduo (40 cm do nível do solo) com uma frequência de corte de 28 (verão) e 42 (inverno) dias. A avaliação de desempenho do modelo foi realizada por meio dos coeficientes de determinação, índice de concordância (d), índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE), erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM) e raiz do quadrado médio do erro (RQME). Para melhoria na estimativa do crescimento de capim-mombaça foram feitos ajustes na  $T_b$  (temperatura basal), foi ajustada de 8,9°C para 10,8°C para o capim-mombaça. O valor de coeficiente de extinção de luz (k) foi ajustado de 0,65 para 0,62 e a área foliar padrão (AFE) padrão de 0,02 para 0,021 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. A eficiência de uso da radiação (RUE) para planta inteira de 1,44 g MJ<sup>-1</sup> para 1,78 g MJ<sup>-1</sup>. O modelo apresentou uma boa performance na simulação de massa de forragem viva após teste ( $R^2$ = 0,64 a 0,93, d= 0,88 a 0,97 e NSE= 0,61 a 0,91, EM= -132,85 a -7,43 g m<sup>-2</sup>, EMA= 33,29 a 148,29 g m<sup>-2</sup> e RQME= 69,56 a 179,29 g m<sup>-2</sup>), comprovando a capacidade de modelo em simular o crescimento do capim-mombaça manejado sob corte em condição irrigada ou não-irrigado, com ou sem adubação nitrogenada e em diferentes climas e biomas brasileiros. O modelo ainda necessita de melhorias na simulação da partição de fotoassimilados, ao efeito de diferentes doses de N no crescimento da pastagem e da área foliar específica.

Palavras-chave: Estimativa de produção de forragem, Doses de nitrogênio, *Panicum maximum* cv. Mombaça, Simulação de sistemas agrícolas

## ABSTRACT

### Parameterization of the APSIM-*Tropical Pasture* model to simulate the growth of *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça guineagrass

Mechanistic models of growth simulation can assist in the synthesis and application of knowledge, and decision-making tools in tropical agricultural systems. APSIM-*Tropical Pasture* is a generic model of growth simulation of *Tropical Pastures*, which can be used as an efficient tool to describe the processes in *Tropical Pasture* agroecosystems. However, it is still necessary to evaluate the model for other tropical species, such as *Megathyrsus maximus* and in suboptimal conditions, through calibration studies and testing the model under severe N stress conditions. Making it to improve the performance of the model in estimation of growth of tropical forages in a wide range of environmental conditions. The objective of this study was to calibrate and test the APSIM-*Tropical Pasture* model to simulate the growth and productivity of *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça guineagrass under different conditions of water availability and nitrogen supply. For calibration, were used data from field experiments with Mombaça guineagrass managed under cut-and-carry management in irrigated and rainfed conditions, conducted in São Carlos/SP. Herbage (above 30 cm) and stubble mass (below 30 cm to ground level) were collected at four cutting frequencies (250, 500, 750 e 1000 degree-days), totaling 19 regrowth cycles (2010-2012). Two independent data sets were used to validate the model, collected from experiments carried out in Lavras/MG and Sinop/MT (11 cycles each). In these experiments, the collecting of herbage (above 40 cm) and stubble (below 40 cm from ground level) had a cutting frequency of 28 (summer) and 42 (winter) days, carried out between 2015 and 2016). To assess the performance model were used: coefficient of determination ( $R^2$ ), agreement index (d), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), Mean error (ME), Mean absolute error (MAE) and Root mean square error (RMSE). To improve the estimate of APSIM-*Tropical Pasture* in simulating the growth of Mombaça guineagrass, adjustments were made in  $T_b$  (base temperature) from 8,9°C to 10,8°C. The light extinction coefficient (k) was adjusted from 0,65 to 0,62 and the standard leaf area (AFE) from 0,02 para 0,021 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. The Radiation Use Efficiency (RUE) for the whole plant was adjusted from 1,44 g MJ<sup>-1</sup> para 1,78 g MJ<sup>-1</sup>. The model presented good performance in the simulation of live forage mass after testing ( $R^2$ = 0,64 a 0,93, d= 0,88 a 0,97 e NSE= 0,61 a 0,91, EM= -132,85 a -7,43 g m<sup>-2</sup>, EMA= 33,29 a 148,29 g m<sup>-2</sup> e RQME= 69,56 a 179,29 g m<sup>-2</sup>), proving the simulation capacity of the model for different evaluated scenarios. The APSIM-*Tropical Pasture* model proved to be efficient in simulating the growth of Mombaça guineagrass managed by cutting, irrigated or rainfed, with or without nitrogen fertilization and in different Brazilian climates and biomes. Despite this, improvements are still needed in the simulation of the photoassimilated partition, the effect of different doses of N on pasture growth, and the simulation of the specific leaf area.

Keywords: Productivity estimate, Tropical forage, *Panicum maximum* cv. Mombaça guineagrass, Simulation of agricultural systems





## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de produção a pasto é preponderante na produção nacional de bovinos. As pastagens ocupam uma área de aproximadamente 160 milhões de há. Dessa área, 111,8 milhões são de pastagens cultivadas (IBGE, 2017). Cerca de 90% dos bovinos abatidos no ano de 2019 no Brasil foram oriundos de terminação a pasto (ABIEC, 2019). Desta forma, o desempenho do sistema de produção de carne e leite a pasto é diretamente influenciado pelo crescimento das plantas forrageiras e da produtividade de pastagens.

No Brasil, o *Megathyrsus maximus* (Jacq.) (syn. *Panicum maximum*) é a segunda espécie mais cultivada e mais produtiva dentre as forrageiras propagadas por sementes (JANK; RESENDE; VALLE, 2008). Devido à sua capacidade adaptativa e ao seu potencial produtivo, essa espécie tem sido estudada pelo programa de melhoramento genético, liderado por pesquisadores do Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Corte (Embrapa-CNPGC), por meio do melhoramento genético e seleção desenvolvido e lançado vários cultivares dessa espécie, como: Mombaça, Tanzânia, Zuri, Massai e, recentemente, o cultivar Tamani. O capim-mombaça, em particular, tem sido bastante utilizado em sistemas de produção mais intensivos, devido à sua elevada produtividade e à alta resposta à adubação nitrogenada (JANK et al., 2010).

Sistemas intensivos de produção necessitam de melhorias no planejamento e na execução das atividades para serem economicamente sustentáveis e resilientes. Com isso, modelos de simulação de crescimento e produtividade de culturas podem ser utilizados como ferramentas de suporte à tomada de decisão, pois integram respostas das plantas a fatores ambientais e de manejo (BOOTE et al., 1998). No âmbito da propriedade rural, os modelos podem auxiliar a estimar a produção, permitindo maior controle sobre a oferta e a demanda de forragem e gerando informações importantes ao produtor quanto ao planejamento das atividades pecuárias (BARIONI et al., 2003).

Apesar da demanda por ferramentas que possam auxiliar na gestão de recursos forrageiros em sistemas pastoris, modelos de predição de crescimento de plantas forrageiras ainda são pouco utilizados na maioria das áreas tropicais (ANDRADE et al., 2016). Dentre vários tipos de modelos, os modelos mecanísticos enquadram-se como de maior complexidade. Eles funcionam com conjuntos de modelos que simulam processos do agroecossistema organizados em módulos de forma a possibilitar simulações com várias interações entre clima, solo e manejo em cenários distintos. As ferramentas adicionais incorporadas nesses modelos ampliam as opções de tomada de decisão gerencial e auxiliam na identificação de lacunas de conhecimento, dessa forma direcionando para pesquisas futuras (LARA; RAKOCEVIC, 2013). Esses modelos podem ser adaptados para condições além das quais foram originalmente gerados. Contudo, eles apresentam limitações que estão atreladas a disponibilidade limitada de informação e conhecimento sobre os processos físicos e fisiológicos envolvidos no crescimento de plantas forrageiras tropicais, às respostas do sistema a ser simulado e à disponibilidade de dados (HOOGENBOOM, 2000; MARIN et al., 2014).

Muitos modelos têm sido desenvolvidos, calibrados e validados para representar com precisão a maior possibilidade de práticas de manejo e condições ambientais. Alguns modelos mecanísticos têm sido adaptados para forrageiras tropicais em condições brasileiras, como: modelo CROPGRO Perennial Forage do DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), inicialmente criado para simulação de *Paspalum notatum* (RYMPH et al., 2004) e que foi adaptado para *Urochloa brizantha* cv. Xaraés (syn. *Brachiaria brizantha*) (PEDREIRA et al., 2011), *M. maximus* cv. Tanzânia (LARA et al., 2012) e *U. brizantha* cv. Marandu e Mulato II (PEQUENO et al 2014; 2017); e o APSIM-Growth da plataforma APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator), que foi parametrizado para *Panicum coloratum* e calibrado por Araújo et al. (2013) para *M. maximus* cv. Mombaça na versão APSIM 7.3. Mais

recentemente, o modelo *APSIM-Tropical Pasture* foi desenvolvido para a versão do APSIM Next Generation (HOLZWORTH et al. 2014; HOLZWORTH et al. 2015), sendo parametrizado para simulação de *U. brizantha* cv. Piatã (BOSI et al., 2020).

O *APSIM-Tropical Pasture* é um modelo genérico de pastagens que pode ser usado para simular o crescimento de espécies de gramíneas tropicais, incluindo os efeitos de manejo sob corte ou pastejo no crescimento e produtividade de pastagem (BOSI et al., 2020). Esse modelo em relação aos demais modelos citados anteriormente, apresenta melhorias na modelagem de pastagens tropicais, entre elas: melhoria na capacidade de simulação de crescimento inicial; simulações de partição do crescimento e senescência, considerando os efeitos do florescimento, o que ainda não havia sido implementado em um modelo de pastagem tropical; e nas simulações de mobilização e realocação de nitrogênio. Apesar do modelo simular de forma satisfatória o crescimento e a produtividade do capim Piatã sob várias condições ambientais e manejo (sequeiro e irrigado, baixa e alta adubação nitrogenada e sistemas sob manejo de corte e pastejo), Bosi et al. (2020) cita a necessidade de melhorias nos parâmetros que arbitram a mobilização e alocação da matéria seca (MS) e de N, bem como a inserção de cálculos que permitam o modelo controlar a remobilização e realocação de MS e N, reciclados de órgãos senescentes.

Atualmente, embora seja possível executar simulações de crescimento de *Urochloa brizantha* com ajuste mínimo de parâmetros do modelo *APSIM-Tropical Pasture* (BOSI et al., 2020; GOMES et al., 2020), ainda é necessário avaliar o modelo para outras espécies tropicais, como a *Megathysus maximus*, que é a segunda espécie de maior uso no Brasil, bem como condições subótimas, por meio de estudos para calibração e teste do modelo em condições de estresse severo de Gomes et al. (2020) aponta a necessidade de melhorias da simulação do crescimento sob o efeito de adubação nitrogenada em diferentes períodos de crescimento, fazendo com que os modelos sejam mais acurados na estimativa da produtividade de forrageiras tropicais, e tornando essa ferramenta cada vez mais promissora no monitoramento e gerenciamento de sistemas pastoris.

## 1.1. Hipóteses

O modelo *APSIM-Tropical Pasture* necessita de ajustes para simular de forma satisfatória o crescimento e a produtividade de *M. maximus* cv. Mombaça em diferentes condições de disponibilidade hídrica e suprimento de N; e após ajustes, o modelo pode simular de forma satisfatória a partição de massa seca e N em *M. maximus* cv. Mombaça..

## 1.2. Objetivos gerais

Calibrar e testar o modelo *APSIM-Tropical Pasture* para simulação do crescimento e produtividade de *Megathysus maximus* cv. Mombaça e do processo de partição de nitrogênio durante a rebrotação.

### 1.2.1. Objetivos específicos

Calibrar e testar o modelo *APSIM-Tropical Pasture* para simulação do crescimento e produtividade de *Megathysus maximus* cv. Mombaça sob adubação nitrogenada em condições de sequeiro e irrigado;

Ajustar os parâmetros que arbitram os processos de partição de nitrogênio do modelo APSIM-*Tropical Pasture* para *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça.

## Referências

- ABIEC. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. **Beef Report Perfil da Pecuária no Brasil**. Brasília:DF. 2019.
- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; DE ARAUJO, L. C.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; MARIN, F.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 71, n. 1, p. 54-65, 2016.
- ARAUJO, L.C.; SANTOS, P. M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P.; CRUZ, P. G. Simulating Guinea grass production: empirical and mechanistic approaches. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 61-69, 2013.
- BARIONI, L.G.; MARTHA JÚNIOR, G.B.; RAMOS, A.K.B.; VELOSO, R.F.; RODRIGUES, D. de C.; VILELA, L. Planejamento e gestão do uso de recursos forrageiros na produção de bovinos em pastejo. In: **Anais do Simpósio sobre Manejo de Pastagens**, 20, 2003. Piracicaba: FEALQ, p. 105-153.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N. B. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. p. 99-128.
- BOSI, C. et al. APSIM-Tropical Pasture: A model for simulating perennial tropical grass growth and its parameterisation for palisade grass (*Brachiaria brizantha*). **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102917, 2020..
- FEITOSA, T. S. **Respostas agronômicas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e *Panicum maximum* cv. Mombaça em função do suprimento de nitrogênio e água**. 2017. 58 p. Tese (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 137–157, 2000.
- HOLZWORTH, D. P et al. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [2017]. Disponível em:<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2017/agropecuario.pdf>>. Acesso em: 01 de jan. 2020.
- GOMES, F. J. et al. Parameterization of the APSIM model for simulating palisadegrass growth under continuous stocking in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102876, 2020.
- JANK, L.; MARTUSCELLO, J. A; EUCLIDES, V. P. B.; VALLE, C. B.; RESENDE, R. M. S. *Panicum maximum*. In: FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A (Eds.). **Plantas forrageiras**. Viçosa, MG:UFV, 2010, p. 166-196.
- JANK, L.; RESENDE, R. M. S.; VALLE, C. D.; RESENDE, M. D.; CHIARI, L.; CANÇADO, L. J.; SIMIONI, C. Melhoramento genético de *Panicum maximum*. In: RESENDE et al. (Eds.). **Melhoramento de forrageiras tropicais**. EMBRAPA, Campo Grande, MS, Brasil. 2008. p. 55–87.
- LARA, M. A. S.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; PEDREIRA, B. C.; MORENO, L. S. B.; ALDERMAN, P. D. Predicting growth of *Panicum maximum*: an adaptation of the CROPGRO - perennial forage model. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 600-611, 2012.

- LARA, M.A.S.; RAKOCEVIC, M.. Uso de modelos matemáticos no estudo de pastagens.. In: Reis, R.A.; Bernardes, T.F.; Siqueira, G.R. **Forragicultura: ciência, tecnologia e gestão dos recursos forrageiros**. Gráfica Multipress, Jaboticabal, SP, BR. 2013, p. 333-346.
- MARIN, F. R.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 49-63, 2014.
- PEDREIRA, B. C. et al. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, p. 370-379, 2011.
- PEQUENO, D. N.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J. Simulating forage production of Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) with the CROPGRO Perennial Forage model. **Crop and Pasture Science**, v. 65, n.12, p.1335-1348, 2014.
- PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; ALDERMAN, P. D.; FARIA, A. F. G. Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: Implications for comparison of three *Tropical Pasture* grasses. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 2, p. 440-455, 2017.
- RYMPH, S. J.; BOOTE, K. J.; IRMAK, A.; MISLEVY, P.; EVERS, G. W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: developing physiological parameters. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, v. 63, p. 37-51, 2004.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Uso de modelos matemáticos na simulação de crescimento e produtividade de plantas forrageiras tropicais**

Modelos de simulação de produção de forragem podem ser utilizados como ferramentas de suporte à tomada de decisão, pois integram respostas das plantas e características específicas de cada local (BOOTE et al., 1998). Para alcançar esse objetivo, modelos devem ser desenvolvidos, calibrados e validados para representar com precisão a maior possibilidade de práticas de manejo e condições ambientais (HOOGENBOOM et al., 1994).

Os modelos de simulação de crescimento e produtividade podem auxiliar na síntese e aplicação de conhecimento, planejamento de experimento e como ferramenta de tomada de decisão em sistemas agrícolas. O uso de modelos na pesquisa pode auxiliar na identificação de lacunas de conhecimento e fornece subsídios teóricos para estudos mais complexos. Nas propriedades agropecuárias, os modelos auxiliam na estimativa da produção, permitindo maior controle sobre a oferta e a demanda de alimentos e gerando informações importantes ao produtor quanto ao planejamento das atividades (BARIONI et al., 2003).

Em geral, a maior limitação no uso de modelos de simulação é a disponibilidade limitada de informação e conhecimento sobre os processos físicos e fisiológicos envolvidos, as respostas do sistema a ser simulado, e disponibilidade de dados (HOOGENBOOM, 2000; MARIN et al., 2014).

### **2.2. Tipos de modelos**

Quando focamos somente nos modelos matemáticos, eles foram classificados por Thornley (2001) em dinâmicos, estáticos, determinísticos, estocásticos, empíricos e mecanísticos.

Os modelos dinâmicos e estáticos levam em consideração a forma como são tratadas as mudanças no tempo físico. Dinâmicos são aqueles que incluem o tempo como uma de suas variáveis, descrevendo as mudanças ocorridas e as respostas ocorridas no tempo. Estáticos são aqueles que não consideram o tempo como uma variável que os compõem, gerando respostas válidas para um determinado momento e condição. Entretanto, os modelos estáticos fazem parte de modelos dinâmicos, fornecendo dados compilados para novas fases do processo em estudo (LARA; RAKOCEVIC, 2013).

Modelos determinísticos e estocásticos consideram a forma como as respostas são geradas. Determinísticos são aqueles que obtêm a mesma solução para um mesmo conjunto dados de entrada, sendo o estado do sistema determinado, em um dado momento, resultante do estado do sistema no momento anterior. E os estocásticos são os modelos em que os processos são descritos por meio das leis de probabilidade, gerando uma distribuição de respostas para certos conjuntos de variáveis de entrada (THORNLEY, 2001).

Modelos empíricos e mecanísticos levam em consideração a forma como se contemplam as informações. Modelos matemáticos empíricos são baseados em dados simplesmente observados. Geralmente, modelos empíricos são formulados após a realização de experimentos e análise dos dados, sendo idealizado um modelo matemático que se ajuste aos dados observados (LARA; RAKOCEVIC, 2013).

Os modelos empíricos também são chamados de modelos de correlação ou estatísticos (DOURADO-NETO et al., 1998), pois oferecem pouco ou nenhum entendimento sobre a causa-efeito dos processos envolvidos, e

são delineados para obtenção de correlações entre a produção vegetal com uma ou mais variáveis como temperatura, radiação, disponibilidade de água e nutrientes, especialmente, nitrogênio (ANDRADE et al., 2016). Neste caso não há muito interesse em explicar detalhadamente por que o sistema responde de tal forma a uma dada condição.

Modelos mecanísticos são baseados em leis da física, química, e biologia envolvidas no processo. Quando se deseja entender a resposta de um sistema biológico, considerando os mecanismos reconhecidos, o modelo mecanístico é mais adequado do que o empírico. Assim, um modelo mecanístico pode ser construído com base na estrutura do sistema, dividindo o sistema em componentes e tentando entender o comportamento do sistema como um todo, em termos das respostas dos componentes individuais e suas interrelações (LARA; RAKOCEVIC, 2013).

Ao delinear um modelo mecanístico, é necessário realizar uma série de suposições ou hipóteses que consistirão a base do modelo, que serão descritas matematicamente e organizado em equações. Geralmente, pesquisadores que utilizam modelos mecanísticos tendem a construir seus modelos antes de realizar experimentos, sendo então realizados com a finalidade de testar as hipóteses previamente incluídas na modelagem. As divisões devem ser consideradas com certa reserva, uma vez que os modelos não podem ser rigorosamente classificados por serem somente em um único tipo entre os descritos neste item. Por exemplo, um modelo mecanístico podem apresentar um certo grau de empirismo.

### **2.3. Modelagem de simulação da produtividade**

Os modelos matemáticos desenvolvidos para a simulação da produtividade de sistemas agropecuários são, geralmente, divididos em modelos de produtividade potencial, de produtividade restrita e de produtividade reduzida (van de VEN et al., 2003). Nessa classificação, os modelos de produtividade potencial consideram fatores que definem as máximas taxas de crescimento (características genéticas, radiação, temperatura). Modelos de produtividade restrita consideram também fatores limitantes, como água e nutrientes, e modelos de produtividade reduzida consideram, além desses fatores como plantas daninhas, pragas e doenças.

Os modelos de produtividade e crescimento podem ser usados por pesquisadores para examinar hipóteses científicas. Com modelos simples, o modelo é muitas vezes a hipótese do comportamento do sistema. Com modelos mais complexos, é testado mais frequentemente como um determinado processo funciona ou como a planta responde a um determinado fator. A hipótese testada não precisa necessariamente ser a capacidade de prever a produtividade, mas a capacidade de prever processos intermediários, como assimilação instantânea ou diária do dossel, respiração, transpiração, assimilação e alocação de nitrogênio. Os modelos também podem se destacar onde falta informação e compreensão sobre o determinado processo. Em alguns casos, isso se torna óbvio quando o modelo não responde como esperado para algum fator ambiental ou de manejo (BOOTE et al., 1996).

A escolha do modelo a ser utilizado depende dos objetivos da simulação e das informações disponíveis. Modelos mecanísticos são desenvolvidos com base na compreensão dos fenômenos que permitem seu uso em várias condições, mas isso exige mais informações e dados (ANDRADE et al., 2016). Os modelos empíricos são simples de desenvolver e de fácil aplicação. Eles são, no entanto, mais propensos a erros e são limitados às faixas de condições em que foram calibrados (DOURADO-NETO et al., 1998).

## 2.4. Modelos mecanísticos

Os modelos mecanísticos ou baseados em processos, enquadram-se em uma escala de maior complexidade. Eles funcionam com conjuntos de dados organizado e arquivados de forma que são possíveis simulações, com várias interações entre clima, solo e manejo em cenários distintos, além de ser possível a otimização dos parâmetros do modelo com a realimentação de dados. As ferramentas adicionais incorporadas nestes modelos ampliam as opções de tomada de decisão gerencial e auxiliam na identificação de lacunas de conhecimento, dessa forma direcionando para pesquisas futuras (LARA; RAKOCEVIC, 2013).

Como os modelos mecanísticos simulam o crescimento com base em processos fisiológicos e outros processos do sistema de cultivo, eles podem ser adaptados para condições além daquelas sob as quais foram originalmente gerados. Recentemente, foram feitas parametrizações dos modelos CROPGRO-*Perennial Forage* e APSIM-*Growth* para forrageiras tropicais utilizadas no Brasil (PEDREIRA et al., 2011; LARA et al., 2012; ARAÚJO et al., 2013; PEQUENO et al., 2014).

O modelo CROPGRO é um modelo mecanicista que prediz a produção e composição básica dos tecidos da planta, informações sobre o clima e manejo do solo, permitindo a simulação dos balanços de água, nitrogênio, matéria orgânica e dinâmica de resíduos no solo, além de danos por pragas e/ou doenças, permitindo que este modelo seja aplicado nas mais diversas situações (BOOTE et al., 2002; JONES et al., 2003). O modelo tem a capacidade de responder às variáveis ambientais (temperatura, precipitação, fotoperíodo, umidade do solo, etc.), bem como de manejo (fertilizantes, irrigação, frequência de colheita, etc.), e ainda pode ser facilmente adaptado para simular a produção de outras espécies forrageiras evitando que o modelo seja reescrito a cada nova espécie a ser modelada (RYMPH et al., 2004).

Rymph et al. (2004) desenvolveu e parametrizou o modelo CROPGRO, criando o CROPGRO Perennial Forage model versão 4.0, que é uma versão do CROPGRO para forrageiras perenes, dando-lhe a capacidade de estimar a rebrotação e concentração de N dos tecidos de *Paspalum notatum* em resposta às variações diárias no clima, fertilização e manejo da cultura. Desde então o modelo tem sido aperfeiçoado e utilizado em adaptações de parâmetros para permitir a previsão de várias outras forrageiras tropicais.

O CROPGRO foi desenvolvido como um modelo autônomo, mas também está acoplado à plataforma DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), que tem modelos para simular o crescimento de 42 culturas na versão mais recente 4.6 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer [DSSAT], 2015). No Brasil, CROPGRO foi calibrado para *U. brizantha* cv. Xaraés (PEDREIRA et al., 2011), *U. brizantha* cv. Marandu (PEQUENO et al., 2014) e para *M. maximus* cv. Tanzânia (LARA et al., 2012).

APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator) é um sistema de modelos modular desenvolvido pela unidade de pesquisa de sistemas de produção na Austrália para simular processos biofísicos do sistema agrícola completo. A estrutura modular é flexível e atualmente o sistema é capaz de simular o crescimento de 30 diferentes culturas e espécies forrageiras (HOLZWORTH et al., 2014). APSIM-*Growth* é um módulo para simular crescimento de forragem, e foi usado anteriormente para simular a produção de matéria seca acima do solo de *P. coloratum* na Austrália.

O modelo foi posteriormente parametrizado para condições brasileiras, para *M. maximus* cv. Mombaça por Araújo et al. (2013), usando um conjunto de dados de São Carlos, São Paulo. Usando a parametrização original, o crescimento simulado pelo APSIM não foi capaz de estimar com acurácia satisfatória para *M. maximus*. Os autores também relataram a necessidade de mudanças em muitos parâmetros originais, tais como temperaturas ótima e base,



área foliar específica e eficiência do uso da radiação. Após a parametrização, os modelos foram avaliados usando conjuntos de dados independentes para condições sob irrigação e sequeiro, registrando resultados satisfatórios.

Atualmente, embora seja possível executar simulações para alguns cultivares de *Urochloa brizantha* e *Megathyrsus maximus* com ajuste mínimo de parâmetros dos modelos CROPGRO e APSIM, ainda há necessidade de testar esses modelos sob condições de estresse hídrico severo e/ou calor, bem como, em condições de estresse nutricional com a ausência de suprimento de N. Para que os modelos sejam mais acurados na estimativa da produtividade de forrageiras tropicais.

## Referências

- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; ARAÚJO, L. C. de; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; MARIN, F. R.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 71: p.54-65, 2016
- ARAÚJO, L.C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, R.; PEZZOPANE, J.R.M.; OLIVEIRA, P.P.A.; CRUZ P.G. Simulating Guineagrass production: empirical and mechanistic approaches. **Agronomy Journal**, v. 105, p. 61-69, 2013.
- BARIONI, L.G.; MARTHA JÚNIOR, G.B.; RAMOS, A.K.B.; VELOSO, R.F.; RODRIGUES, D.C.; VILELA, L. Planejamento e gestão do uso de recursos forrageiros na produção de bovinos em pastejo. In: **Anais do Simpósio sobre Manejo de Pastagens**, 20, FEALQ, Piracicaba, SP, BR, p. 105-153. 2003.
- BOOTE, K. J.; JONES, J.W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal** v. 88, p.704-716, 1996.
- BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N.B. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., ed. **Understanding options for agricultural production**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NLD, 1998 p. 99-128
- BOOTE, K. J.; MINGUEZ, M. I.; SAU, F. Adapting the CROPGRO legume model to simulate growth of faba bean. **Agronomy Journal**, v 94, p.743–756, 2002
- DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S.. Principles of crop modelling and simulation. I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola** v. 55, p.46–50, 1998.
- Decision Support System for Agrotechnology Transfer [DSSAT]. 2016. Disponível em: <http://dssat.net/> [Acesso em 10 jun. 2019].
- HOLZWORTH, D.P.; HUNT, N.I.; DEVOIL, P.G.; ZURCHER, E.J.; HERRMANN, N.I.; MCLEAN G.; CHENU, K.; OOSTEROM, E.J.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A.D.; BROWN H.; WHISH J.P.M.; VERRAL S.; FAINGES, J.; BELL, L.W.; PEAKE, A.S.; POULTON, P.L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P.J.; GAYDON, D.S.; DALGLIESH, N.P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F.Y.; WANG E. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software** v.62, p.327–350, 2014.
- HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. BEANGRO: a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. **Agronomy Journal**, v. 86, p. 182–190, 1994.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.137–157, 2000,

- JONES, J.W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER C.H.; BOOTE, K.J.; BATCHELOR, W.D.; HUNT, L.A.; WILKEN, S. P.W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A.J.; RITCHIE, J.T. The DSSAT cropping system model. **European Journal of Agronomy**, v.18, p.235–265, 2003.
- LARA, M.A.S.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; PEDREIRA, B.C.; MORENO, L.S.B.; ALDERMAN, P.D.. Predicting growth of *Panicum maximum*: an adaptation of the CROPGRO - perennial forage model. **Agronomy Journal** v. 104, p. 600-611, 2012.
- LARA, M.A.S.; RAKOCEVIC, M. Uso de modelos matemáticos no estudo de pastagens. In: Reis, R.A.; Bernardes, T.F.; Siqueira, G.R. **Forragicultura: ciência, tecnologia e gestão dos recursos forrageiros**. Gráfica Multipress, Jaboticabal, SP, BR. 2013, p. 333-346
- MARIN, F.R.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 49-63, 2014.
- PEDREIRA, B.C.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J.; LARA, M.A.S.; ALDERMAN, P.D. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v.120, p. 370-379, 2011.
- PEQUENO, D.N.L.; PEDREIRA, C.G.S.; BOOTE, K.J. Simulating forage production of Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) with the CROPGRO Perennial Forage model. **Crop and Pasture Science**, v.65, p. 1335-1348, 2014.
- RYMPH, S.J.; BOOTE, K.J.; IRMAK, A.; MISLEVY, P.; EVERS, G.W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: developing physiological parameters. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, v.63, p.37–51, 2004.
- THORNLEY, J.H.M.; JHONSON, I.R. Plant and crop modelling: A mathematical approach to plant and crop physiology. Clarendon **Press**, Oxford, MS, USA, 1990,
- THORNLEY, J.H.M. Modelling grassland ecosystem.. In: **Proceedings of International Grassland Congress**. FEALQ, Piracicaba, SP, BR., 2001, p. 1029-1036.
- VAN DE VEN, G.W.J; DE RIDDER, N.; VAN KEULEN, H.; VAN ITTERSUM, M.K. Concepts in production ecology for analysis and design of animal and plant production system. **Agricultural Systems**, v.76, p. 507-525, 2003.



### 3. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM-TROPICAL PASTURE PARA A SIMULAÇÃO DE CRESCIMENTO DE *Megathyrus maximus* cv. MOMBAÇA SOB CORTE EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA E SUPRIMENTO DE NITROGÊNIO

#### RESUMO

O APSIM-*Tropical Pasture* é um modelo genérico de simulação de crescimento de pastagens tropicais, que pode ser utilizado como uma ferramenta eficiente para descrever os processos em agroecossistemas de pastagens tropicais. Entretanto, há a necessidade de ajuste dos parâmetros para simulação de outras espécies e melhorias na simulação de partição da matéria seca para crescimento e utilização de nitrogênio (N). Objetivou-se com esse estudo calibrar e testar o modelo APSIM-*Tropical Pasture* na simulação do crescimento e produtividade de *Megathyrus maximus* cv. Mombaça sob diferentes condições de disponibilidade hídrica e suprimento de nitrogênio. Para a calibração, foram utilizados dados de experimentos de campo com capim-mombaça conduzidos em São Carlos/SP, manejado sob corte em condição irrigada e em sequeiro, onde foram realizadas colheitas de massa de forragem (acima de 30 cm) e de massa de resíduo (abaixo de 30 cm até o nível do solo), em quatro frequências de corte (250, 500, 750 e 1000 graus-dia), totalizando 19 ciclos de rebrotação (2010-2012). Para a validação do modelo, foram utilizados dois conjuntos de dados independente, originados de experimentos conduzidos em Lavras/MG e Sinop/MT (11 ciclos cada). Nesses experimentos, as colheitas de massa de forragem (acima de 40 cm) e resíduo (abaixo de 40 cm do nível do solo) com uma frequência de corte de 28 (verão) e 42 (inverno) dias, realizadas entre 2015 e 2016. A avaliação de desempenho do modelo foi realizada por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice de concordância (d), índice de eficiência Nash-Sutcliffe (NSE), erro médio (EM), erro absoluto médio (EAM) e raiz do quadrado médio do erro (RQME). Com o propósito de melhorar a estimativa do APSIM-*Tropical Pasture* para simular o crescimento de capim-mombaça foram feitos ajustes na  $T_b$  (temperatura basal), de 8,9°C para 10,8°C para o capim-mombaça. O valor do coeficiente de extinção de luz (k) foi ajustado de 0,65 para 0,62 e a área foliar específica padrão, de 0,02 para 0,021 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. A eficiência de uso da radiação (RUE) para planta inteira de 1,44 g MJ<sup>-1</sup> para 1,78 g MJ<sup>-1</sup>. O modelo apresentou uma boa performance na simulação de massa de forragem viva após teste ( $R^2$ = 0,64 a 0,93, d= 0,88 a 0,97 e NSE= 0,61 a 0,91, EM= -132,85 a -7,43 g m<sup>-2</sup>, EAM= 33,29 a 148,29 g m<sup>-2</sup> e RQME= 69,56 a 179,29 g m<sup>-2</sup>), comprovando a capacidade de simulação do modelo para diferentes cenários avaliados. O modelo APSIM-*Tropical Pasture* mostrou-se eficiente em simular o crescimento do capim-mombaça manejado por corte, irrigado ou não-irrigado, com ou sem adubação nitrogenada e em diferentes climas e biomas brasileiros.

**Palavras-chave:** Estimativa de produtividade, Forrageira tropical, *Panicum maximum* cv. Mombaça, Simulação de sistemas agrícolas.

#### ABSTRACT

APSIM-*Tropical Pasture* is a generic model of growth simulation of *Tropical Pastures*, which can be used as an efficient tool to describe the processes in *Tropical Pasture* agroecosystems. However, there is a need to adjust the parameters to simulate other species and to improve the simulation of dry matter partition for growth and use of nitrogen (N). The objective of this study was to calibrate and test the APSIM-*Tropical Pasture* model to simulate the growth and productivity of *Megathyrus maximus* cv. Mombaça guineagrass under different conditions of water availability and nitrogen supply. For calibration, were used data from field experiments with Mombaça guineagrass managed under cut-and-carry management in irrigated and rainfed conditions, conducted in São Carlos/SP. Herbage (above 30 cm) and stubble mass (below 30 cm to ground level) were collected at four cutting frequencies (250, 500, 750 e 1000 degree-days), totaling 19 regrowth cycles (2010-2012). Two independent data sets were used to validate the model, collected from experiments carried out in Lavras /MG and Sinop / MT (11 cycles each). In these experiments, the collecting of herbage (above 40 cm) and stubble (below 40 cm

from ground level) had a cutting frequency of 28 (summer) and 42 (winter) days, carried out between 2015 and 2016). To assess the performance model were used: coefficient of determination ( $R^2$ ), agreement index (d), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), Mean error (ME), Mean absolute error (MAE) and Root mean square error (RMSE). To improve the estimate of APSIM-*Tropical Pasture* in simulating the growth of Mombaça guineagrass, adjustments were made in  $T_b$  (base temperature) from 8.9°C to 10.8°C. The light extinction coefficient (k) was adjusted from 0.65 to 0.62 and the standard leaf area (AFE) from 0.02 para 0.021 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>. The Radiation Use Efficiency (RUE) for the whole plant from was adjusted from 1.44 g MJ<sup>-1</sup> para 1.78 g MJ<sup>-1</sup>. The model presented good performance in the simulation of live forage mass after testing ( $R^2= 0.64$  a 0.93,  $d= 0.88$  a 0.97 e  $NSE= 0.61$  a 0.91,  $EM= -132.85$  a  $-7.43$  g m<sup>-2</sup>,  $EMA= 33.29$  a 148.29 g m<sup>-2</sup> e  $RQME= 69.56$  a 179.29 g m<sup>-2</sup>), proving the simulation capacity of the model for different evaluated scenarios. The APSIM-*Tropical Pasture* model proved to be efficient in simulating the growth of Mombaça guineagrass managed by cutting, irrigated or rainfed, with or without nitrogen fertilization and in different Brazilian climates and biomes.

**Keywords:** Productivity estimate, Tropical forage, *Panicum maximum* cv. Mombaça guineagrass, simulation of agricultural systems

### 3.1. Introdução

A área ocupada com pastagens no Brasil é de aproximadamente 160 milhões de hectares (IBGE, 2017). Esta representa a principal fonte de alimento do rebanho bovino brasileiro que possui, atualmente, cerca de 232 milhões de cabeças (USDA, 2018).

Os sistemas de produção de carne e leite a pasto são diretamente influenciados pela produtividade das pastagens. O crescimento das plantas forrageiras depende das suas interações com as variáveis ambientais. Temperatura do ar, radiação solar, fotoperíodo e disponibilidade hídrica são as variáveis ambientais que mais afetam a produção de biomassa de forrageiras tropicais (ZHU; LONG; ORT, 2008; PEDREIRA, 2009), além do suprimento de nitrogênio (N) e do manejo do pastejo. Esses são fatores preponderantes que podem provocar flutuações estacionais e/ou anuais na produção.

O *Megathyrsus maximus* (Jacq.) (SIMON; JACOBS, 2003) (syn. *Panicum maximum*) é uma das espécies de forrageiras tropicais propagadas por sementes mais produtivas. Além disso, essa forrageira possui elevado valor nutritivo e é adaptada a várias regiões do Brasil e do mundo (JANK et al, 2010). Devido ao seu alto potencial produtivo, essa espécie desenvolve-se bem em locais com precipitação superior a 800 mm, alta temperatura e com solos de elevada fertilidade (MUIR; JANK, 2004).

O *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça, em particular, tem sido bastante utilizado em sistemas de produção mais intensivos, devido a sua elevada produtividade e resposta à adubação nitrogenada (JANK et al., 2008). Os sistemas intensivos de produção em pastagens demandam um bom planejamento e execução das atividades para garantir sua sustentabilidade e resiliência. Os modelos de simulação de crescimento e produtividade de culturas podem ser utilizados como ferramentas de suporte à tomada de decisão, pois integram respostas das plantas aos fatores ambientais e de manejo (BOOTE et al., 1998). Em nível de propriedade, os modelos podem auxiliar, entre outras finalidades, a estimar a produção, permitindo maior controle sobre a oferta e a demanda de forragem e gerando informações importantes ao produtor quanto ao planejamento das atividades pecuárias (BARIONI et al., 2003).

Apesar da demanda por ferramentas que possam auxiliar na gestão de recursos forrageiros em sistemas pastoris, modelos de predição de crescimento de plantas forrageiras ainda são pouco utilizados na maioria das áreas tropicais (ANDRADE et al., 2016). Os modelos mecanísticos são aqueles baseados em processos fisiológicos e na interação desses com os outros processos do agroecossistema (LISSON et al., 2005). Esses modelos podem ser

adaptados para condições diferentes daquelas para as quais foram originalmente gerados. Contudo, eles apresentam limitações, que estão atreladas à disponibilidade limitada de informação e conhecimento sobre os processos físicos e fisiológicos envolvidos no crescimento de plantas forrageiras tropicais e sobre as respostas do sistema a ser simulado, além da pequena disponibilidade de dados para parametrização e teste dos modelos (HOOGENBOOM, 2000; MARIN et al., 2014).

O Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM) é uma plataforma de modelos desenvolvidos para simular os processos biofísicos de ecossistemas agrícolas, que compreendem processos do solo e planta e suas interações com os fenômenos atmosféricos (HOLZWORTH et al., 2014). O APSIM é capaz de simular o crescimento e a produtividade de mais de 30 diferentes culturas (HOLZWORTH et al., 2014). Dentre os modelos que simulam o crescimento de plantas forrageiras na plataforma APSIM, o modelo APSIM-Growth (HUTH et al., 2002) simula o crescimento de árvores e gramíneas forrageiras tropicais, inicialmente parametrizado para simular o crescimento de *Panicum coloratum* cv. Bambatsi (WHITBREAD; CRAIG, 2010) e posteriormente para *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça (ARAÚJO et al., 2013). O modelo simula o crescimento diário de plantas forrageiras com base na eficiência de uso da radiação, interceptação da radiação solar, temperatura do ar, déficit de pressão de vapor, disponibilidade de água e nitrogênio no solo. Com base nos cálculos de crescimento diário, estima-se a massa de forragem acima do solo, a partição de biomassa entre órgãos da planta e a senescência. Apesar disso, o APSIM-Growth não possui funções necessárias para simular a produtividade de pastagens tropicais de forma que capte uma ampla faixa de cenários no ecossistema pastoril (BOSI et al., 2020). As principais limitações são: não considerar que há mudança de partição entre os órgãos e senescência de acordo com os estádios fenológicos da planta; considerar uma área foliar específica fixa que não responde a fatores ambientais; não ter mecanismo para simular a remobilização de reserva e os efeitos do pastejo sob o dossel forrageiro (BOSI et al., 2020).

Recentemente, foi desenvolvido na plataforma APSIM um modelo genérico de pastagens tropicais, o APSIM-Tropical Pasture (BOSI et al., 2020) que pode ser usado para simular o crescimento de espécies de gramíneas tropicais, incluindo os efeitos de manejo sob corte ou pastejo sobre a produtividade de pastagem. O APSIM-Tropical Pasture apresenta melhorias na modelagem de pastagens tropicais, entre elas: melhoria na capacidade de simulação de crescimento inicial; nas simulações de partição do crescimento e senescência, considerando os efeitos do florescimento; e nas simulações de mobilização e realocação de nitrogênio. Apesar do modelo simular de forma satisfatória o crescimento e a produtividade de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã, sob várias condições ambientais e de manejo (sequeiro e irrigado e sistemas sob manejo de corte e pastejo, Bosi et al. (2020) citam a necessidade de melhorias nos parâmetros que arbitram a mobilização e alocação da matéria seca (MS) e de N, bem como a inserção de cálculos que possibilitem o controle da remobilização e realocação de MS e N, reciclados de órgãos senescentes.

O modelo APSIM-Tropical Pasture foi parametrizado inicialmente para *U. brizantha* cv. BRS Piatã e considerando as diferenças existentes entre o capim-piatã e o capim-mombaça, há a necessidade de ajuste dos parâmetros de espécie, e de partição da MS e de N. A hipótese desse estudo é que o modelo APSIM-Tropical Pasture necessita ser parametrizado para simular de forma satisfatória o crescimento e a produtividade do capim-mombaça em diferentes condições de disponibilidade hídrica e suprimento de nitrogênio. Objetivou-se com esse estudo calibrar e validar o modelo APSIM-Tropical Pasture para simulação do crescimento e produtividade de *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça manejado por corte.

## 3.2. Material e métodos

### 3.2.1. Descrição do modelo

O APSIM-*Tropical Pasture* é um modelo genérico de simulação de crescimento e produtividade de espécies forrageiras tropicais sob manejo de corte ou pastejo (BOSI et al., 2020). O modelo foi construído utilizando o APSIM Plant Modelling Framework (BROWN et al., 2014) e desenvolvido para a versão APSIM Next Generation (HOLZWORTH et al., 2018). A principal equação usada na simulação do crescimento está descrita abaixo:

$$G = RUE \times RI \times (Ft, Fn, Fvpd) \times Fw \times FCO_2 \quad (1)$$

Em que: G é o crescimento diário ( $g\ m^{-2}$ ), RUE é a eficiência de uso da radiação solar da planta inteira ( $g\ MJ^{-1}$ ), que representa a razão entre o acúmulo de matéria seca e a radiação solar global interceptada, RI (MJ). O RI é calculado pela lei de Beer-Lambert, utilizando o índice de área foliar (IAF) estimado pelo modelo e um coeficiente de extinção (k). Ft é o fator de temperatura, que é determinado pelas temperaturas cardeais, variando linearmente de 0 a 1 entre a temperatura base inferior (Tb) e a primeira temperatura ótima (TO1), permanecendo constante (= 1) entre TO1 e a segunda temperatura ótima (TO2), e depois diminuindo linearmente de 1 a 0 entre TO2 e a temperatura base superior (TB). Fn é o fator de nitrogênio, que é determinado por uma interpolação linear a partir da concentração de nitrogênio foliar mínima (LNCmin) até a ótima (LNCopt). Fvpd é o fator de déficit de pressão de vapor (VPD), que funciona de maneira semelhante a Fn. Fw é o fator de estresse hídrico determinado pela razão entre o suprimento de água e a demanda de água da planta. FCO<sub>2</sub> é o fator de CO<sub>2</sub>, que calcula o impacto do CO<sub>2</sub> sob a RUE baseado na abordagem de Reyenga et al. (1999). Os fatores de Ft, Fn e Fvpd são regulados por uma função mínimo, na qual apenas o fator mais limitante dentre eles é utilizado para reduzir o crescimento da planta.

O modelo é composto por quatro submodelos, relacionados aos seguintes órgãos vegetais: folha, colmo, raízes e órgãos de reserva. Além, das equações que calculam a partição da matéria seca e nitrogênio na planta. As simulações dos processos no solo que envolvem a água, o nitrogênio e a matéria orgânica superficial são realizadas utilizando os módulos padrões SoilWat, SoilN e SurfaceOM (PROBERT et al. 1998), e a evapotranspiração potencial é calculada pelo módulo MicroClimate (SNOW; HUTH, 2004) que utiliza a equação de Penman-Monteith (ALLEN et al. 1998).

### 3.2.2. Calibração do modelo

#### Dados experimentais

O conjunto de dados utilizado para a calibração do modelo foi oriundo de dois experimentos conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos, SP (21°57'42"S, 47°50'28"O, altitude de 860 m), na mesma área experimental que avaliaram o crescimento de *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum*) cv. Mombaça sob manejo de corte em condições de sequeiro e irrigado (veja mais detalhes em ARAUJO et al., 2013; ARAUJO et al., 2018). O experimento 1, foi realizado entre fevereiro de 2010 e abril de 2011 e o Experimento 2 entre abril de 2011 e outubro de 2012, totalizando um conjunto de dados de 19 ciclos de rebrotação. A Tabela 1 consta as datas de início e fim dos ciclos dos experimentos utilizados na calibração do modelo.

**Tabela 1.** Datas de ciclos de crescimento dos experimentos 1 e 2 feitos em São Carlos-SP, realizados entre 2010 e 2012, usados na calibração do modelo APSIM-*Tropical Pasture*.

Ciclo	Experimento 1		Experimento 2	
	Início	Fim	Início	Fim
1	23/02/2010	12/04/2010	11/04/2011	20/06/2011
2	13/04/2010	31/05/2010	21/06/2011	15/08/2011
3	1/06/2010	27/07/2010	16/08/2011	10/10/2011
4	28/07/2010	20/09/2010	11/10/2011	21/11/2011
5	21/09/2010	08/11/2010	22/11/2011	02/01/2012
6	9/11/2010	21/12/2010	3/01/2012	13/02/2012
7	06/01/2010	20/02/2011	14/02/2012	26/03/2012
8	21/02/2011	10/04/2011	27/03/2012	21/05/2012
9	-	-	22/05/2012	16/07/2012
10	-	-	17/07/2012	10/09/2012
11	-	-	11/09/2012	22/10/2012

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, com textura média (SANTOS et al., 2018). As análises físicas necessárias à caracterização do solo constam na Tabela 2. O clima local é subtropical húmido (classificação de Köppen: Cwa) com uma estação fria e seca, que ocorre de abril a setembro e outra quente e úmida de outubro a março (ALVARES et al., 2013). Os dados climáticos por ciclo dos experimentos 1 e 2 estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 2.** Características físicas do solo da área experimental dos experimentos 1 e 2, feitos em São Carlos-SP. Densidade do solo (BD), umidade do solo seco ao ar (AirDry), ponto de murcha permanente em 15 bar (LL15), capacidade de campo (DUL) e ponto de saturação (SAT), determinados por Araújo et al., (2013). O Coeficiente de extração de água (KL), fator de exploração radicular (XF) e a fração de água acima da DUL que drena por dia (SWCON) foram ajustados por Bosi et al. (2020).

Profundidade	BD	AirDry	LL15	DUL	SAT	KL	XF	SWCON
m	g cm <sup>-3</sup>		mm	mm <sup>-1</sup>		fração d <sup>-1</sup>	0-1	fração d <sup>-1</sup>
0-0,10	1,300	0,146	0,156	0,256	0,500	0,050	1	0,900
0,1-0,2	1,390	0,123	0,133	0,227	0,470	0,050	1	0,900
0,20-0,30	1,440	0,127	0,137	0,223	0,450	0,020	1	0,900
0,30-0,40	1,480	0,137	0,137	0,235	0,440	0,050	1	0,900
0,40-0,50	1,540	0,150	0,154	0,252	0,410	0,040	1	0,900
0,50-0,60	1,560	0,160	0,164	0,256	0,410	0,030	1	0,900
0,60-0,70	1,360	0,165	0,171	0,247	0,270	0,040	1	0,900
0,70-0,80	1,360	0,155	0,155	0,235	0,260	0,030	1	0,900
0,80-0,90	1,360	0,151	0,154	0,243	0,280	0,030	1	0,900
0,90-1,00	1,360	0,138	0,138	0,227	0,260	0,040	1	0,900



**Tabela 3.** Valores médios dos dados climáticos, radiação solar global (Rg, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), temperatura do ar média (Tmed, °C), temperatura do ar máxima (Tmáx, °C), temperatura do ar mínima (Tmin, °C), precipitação pluviométrica acumulada (Pa, mm) e velocidade do vento (u, m s<sup>-1</sup>), de cada ciclo dos experimentos 1 e 2 feitos em São Carlos-SP, entre 2010 e 2012, usados na parametrização do modelo APSIM-*Tropical Pasture*.

	Variável	Ciclo										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Exp. 1	Rg	19,3	17,0	15,1	18,9	18,3	20,4	19,0	14,1	-	-	-
	Tméd	23,4	21,1	18,9	20,6	21,5	23,5	24,2	22,6	-	-	-
	Tmáx	28,7	26,6	25,2	28,2	27,6	29,4	29,8	26,9	-	-	-
	Tmín	18,2	15,7	12,6	13,1	15,5	17,6	18,7	18,3	-	-	-
	Pa	406,6	247,8	51,6	8,8	155,4	159,8	424,6	509,2	-	-	-
	u	1,0	1,0	1,0	1,3	1,2	1,1	0,7	0,9	-	-	-
Exp. 2	Rg	14,5	14,0	18,2	19,4	21,2	18,9	19,5	15,1	12,0	18,1	19,6
	Tméd	19,4	18,9	21,6	21,2	22,8	22,8	23,8	21,0	18,5	20,0	22,3
	Tmáx	25,0	25,9	29,1	27,2	28,8	28,5	29,7	26,5	24,0	27,2	29,1
	Tmín	13,7	12,0	14,0	15,3	16,8	17,2	17,8	15,5	13,0	12,8	15,6
	Pa	127,2	12,4	63,6	291,8	314,4	450,8	83,4	238	236	31,2	141,2
	u	0,8	0,9	1,3	1,3	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	1,0	1,3

#### Experimento 1

A semeadura foi realizada em novembro de 2009 em parcelas (6 x 6 m), com o delineamento em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Nas parcelas irrigadas, a irrigação por aspersão foi acionada sempre que a diferença entre a precipitação diária acumulada e a evaporação do evaporímetro de Piche acumulada registrava valores  $\geq -20$  mm (RSSINI, 2002).

Nesse experimento foram avaliados 8 ciclos de rebrotação entre fevereiro de 2010 e abril de 2011. A mensuração de massa de forragem acima de 0,3 m da superfície do solo (altura do resíduo) foi realizada em quatro momentos a cada ciclo de crescimento: aos 250, 500, 750 e 1000 graus-dia após o corte de uniformização. O corte de uniformização foi feito a 0,3 m acima da superfície do solo (altura do resíduo). Em cada amostragem, a massa de forragem foi mensurada dentro de dois quadrados de 1 m<sup>2</sup> (1x1 m) por parcela.

A fertilização das parcelas foi feita no início de cada ciclo de rebrotação com 71 kg N ha<sup>-1</sup> e 35 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, totalizando 567 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, 280 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 264 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> aplicados na forma de sulfato de amônio, cloreto de potássio e superfosfato simples, respectivamente.

As amostras de forragem foram pesadas e homogeneizadas e, em seguida, foram retiradas duas subamostras de aproximadamente 500 g, uma destinada para a determinação da matéria seca e outra para a separação morfológica em lâmina foliar, colmo (colmo + bainha) e material morto. A determinação do teor de matéria seca (MS) das amostras foi realizada em estufa de ventilação forçada a 60°C até obtenção de massa constante. A produtividade de MS foi determinada pela média das amostras de massa de forragem colhidas em 1 m<sup>2</sup> em cada parcela, multiplicadas pelo seu teor de MS, e em seguida extrapolada para 1 ha (kg ha<sup>-1</sup>). A biomassa de coroa foi considerada como a terça parte da biomassa de colmo presente na massa de forragem do resíduo (colhida a 0,3 m da superfície do solo), assumindo como a biomassa de colmo a 10 cm acima da superfície do solo, uma vez que neste experimento não foi realizado a distinção da coroa na separação morfológica.

A área foliar (AF, m<sup>2</sup>) foi determinada em um integrador de área foliar (Li-Cor LI-3100C), usando uma fração representativa de lâminas foliares verdes, oriundas de amostras de separação morfológica. A área foliar específica

(AFE,  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ) foi determinada pela razão entre AF e MS de folha. O índice de área foliar (IAF,  $\text{m}^2 \text{folha m}^{-2} \text{solo}$ ) foi determinado pela razão entre a área foliar e a área de solo amostrada ( $1 \text{ m}^2$ ).

A temperatura do ar (máxima, mínima e média), a chuva e a radiação global incidente foram obtidas em uma estação meteorológica automática instalada próxima à área experimental. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR, 400-700 nm) foi registrada a 0,3 m acima da superfície do solo usando três barras lineares com sensores quânticos (Apogee Instruments Line Quantum SQ-311). A umidade do solo foi monitorada utilizando um sensor de capacitância (Sentek, 2001) até 1 m de profundidade, no intervalo de 0,1 m.

#### Experimento 2

No segundo experimento, conduzido entre maio de 2011 e outubro de 2012. A amostragem de massa de forragem foi realizada a 0,3 m da superfície do solo, em quatro momentos ao longo de 11 ciclos de rebrota: aos 7, 14, 21, 35 dias no verão e 14, 28, 42 e 55 dias no inverno (Tabela 1). As mensurações de massa de forragem, composição morfológica, AF, IAF e AFE, bem como, a fertilização das parcelas e o manejo de irrigação seguiram os mesmos procedimentos do experimento 1. A massa de forragem e a composição morfológica do resíduo não foram mensuradas neste experimento. Dessa forma, foram considerados os mesmos valores de massa e composição de resíduo registrados no experimento 1 em períodos correspondentes no experimento 2.

### 3.2.3. Calibração de parâmetros

O primeiro passo antes da calibração do APSIM-*Tropical Pasture* para capim-mombaça foi realizar uma simulação utilizando os parâmetros iniciais do modelo, oriundos da parametrização de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã (BOSI et al., 2020). Para essa simulação foram utilizados os dados dos experimentos 1 e 2, empregados na calibração, que avaliaram o crescimento de capim-mombaça sob condição de sequeiro e irrigada. Na simulação com os parâmetros iniciais do modelo foram feitas modificações apenas nas informações sobre a data de semeadura, datas dos ciclos de rebrotação, dados de solo, clima e adubação nitrogenada. Esse passo foi realizado para verificar a capacidade do modelo de simular o crescimento do capim-mombaça e identificar a necessidade de ajuste nos parâmetros para melhorar as estimativas do modelo.

Em seguida, procedeu-se a calibração manual dos parâmetros temperatura base inferior ( $T_b$ ) para crescimento, coeficiente de extinção de luz ( $k$ ), eficiência de uso da radiação (RUE) e AFE padrão, no qual foram utilizados dados obtidos de parcelas adubadas e irrigadas dos experimentos 1 e 2. A  $T_b$  foi determinada pelo método de menor variabilidade de Arnold (1959). Para isso, foi calculado o total de graus-dia (GD) acumulado para cada ciclo de crescimento do dia do corte até o dia em que o dossel interceptasse 95% de PAR (MORENO et al., 2014). Os GD diários foram calculados conforme as equações (2) e (3) (PEREIRA et al., 2002). Apenas nos ciclos 5, 6, 7, 8 (Exp. 1) e 4, 5 e 6 (Exp.2) o dossel alcançou 95% de interceptação da radiação PAR, sendo que os demais ciclos não foram utilizados para a estimativa desse parâmetro. Foram testadas as temperaturas a cada  $0,1^\circ\text{C}$  de incremento, na faixa de temperatura de 0 a  $20^\circ\text{C}$ . A  $T_b$  foi considerada a temperatura que minimizou o desvio padrão dos graus-dia acumulados (PDGDa) entre os ciclos de rebrotação, o desvio padrão em número de dias (DPdia) para atingir 95% de interceptação da PAR. O DPdia foi calculado conforme a equação (4) (MORENO et al., 2014):

$$GD_i = \left( \frac{T_{max_i} + T_{min_i}}{2} - T_b \right) \quad \text{para } T_{min} > T_b \quad (2)$$

$$GD_i = \frac{(T_{max_i} - T_b)^2}{2(T_{max_i} - T_{min})} \quad \text{para } T_b > T_{min} \quad (3)$$

$$DP_{dia} = \frac{PDGDa}{(T_{med} - T_b)} \quad (4)$$

Tem-se como:  $T_{max_i}$  a máxima temperatura do ar diária, a  $T_{min}$  a temperatura mínima diária e  $T_{med}$  a temperatura média diária.

A partir do conjunto de dados utilizados não foi possível estimar as temperaturas ótimas ( $TO_1$  e  $TO_2$ ) e a temperatura base superior ( $T_b$ ) para crescimento, uma vez que a temperatura média máxima em condições de campo foi de 26.8°C, durante o período experimental. Desse modo, os valores de  $TO_1$  e  $TO_2$  foram estabelecidos de acordo com estudo sobre o efeito das temperaturas diurnas e noturnas, que variaram de 10-40 °C, sobre o crescimento de forrageiras (IVORY; WHITEMAN, 1978). Os autores observaram que as maiores taxas de crescimento ocorreram entre 29 e 35°C para as cinco espécies de gramíneas avaliadas, sendo 30°C a  $TO$  para *M. maximus* var. *trichoglume* cv. Petrie. Com isso, a  $TO_1$ ,  $TO_2$  e  $T_b$  foram definidas como 30°C, 35°C e 45°C, respectivamente.

O  $k$  e a eficiência do uso de PAR foram determinados usando dados de crescimento, somente dos ciclos em que a planta se manteve no estágio vegetativo, ciclos 3, 4, 5, 6, 7 (Exp. 1) e ciclos de 2 ao 11 (Exp. 2). O  $k$  para cada ciclo de rebrotação foi determinado pela lei de Beer-Lambert adaptada (BOSI et al., 2020).

A eficiência do uso de PAR foi determinada pela regressão linear entre a MS de forragem e a quantidade de PAR interceptada corrigida. A correção da PAR interceptada foi realizada aplicando a lei de Beer-Lambert para calcular a interceptação total do dossel, uma vez que a mensuração da interceptação da PAR foi realizada apenas na altura do resíduo (30 cm).

A RUE da parte aérea da planta foi calculada multiplicando-se a eficiência do uso da PAR por 0,5. E para o cálculo da RUE da planta inteira, a RUE da parte aérea foi dividida por 0,8, assumindo-se que 20% dos fotoassimilados foram destinados para o crescimento radicular (KINIRY et al., 1996). E a AFE padrão foi definida como o maior valor de AFE (razão entre o IAF e a massa foliar) obtido nos ciclos nos quais o crescimento e a partição não foram afetados pelo florescimento, ciclos 3, 4, 5, 6, 7 (Exp. 1) e ciclos de 2 ao 11 (Exp. 2).

A partição de MS entre órgãos da planta foi calibrada pelo método de tentativa e erro com dados do experimento 1 e 2. O mesmo foi empregado para os demais parâmetros de cultura que não foram listados anteriormente. Em seguida, foi realizada a calibração na partição de N na planta, no qual foram definidos os valores de concentração de N máximo, crítico e mínimo para folha, colmo, coroa e raiz, assumindo-se os mesmos valores para colmo e coroa. Os valores de concentração máxima de N nas folhas (0,0367 g g<sup>-1</sup> MS), colmo (0,0292 g g<sup>-1</sup> MS) e raízes (0,0186 g g<sup>-1</sup> MS), foram extraídos de estudo em casa de vegetação com uso de solução nutritiva avaliando a dinâmica de N na rebrotação de *Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia (EMBRAPA, dados não publicados). E os valores de concentração mínima de N nas folhas (0,0087 g g<sup>-1</sup> MS) (MANARIM; MONTEIRO, 2003), colmo (0,0045 g g<sup>-1</sup> MS) (HARE et al., 2015) e raízes (0,0023 g kg MS<sup>-1</sup>) (GARCEZ; MONTEIRO, 2016) foram obtidos de estudos com capim-mombaça reportados na literatura.

O N ótimo foi definido pela estimativa do status nutricional da planta utilizando-se o índice nutricional do nitrogênio (INN) (GREENWOOD et al., 1990; GASTAL et al., 2015; LEMAIRE; CIAMPITTI, 2020). Para isso foram utilizados dados de experimentos com capim-mombaça que avaliaram as concentrações de N na planta, folhas e colmo (SILVA, 2008; HARE et al., 2015; EMBRAPA, dados não publicados), o que permitiu determinar o nível N

ótimo na planta de 0,0163 g g<sup>-1</sup> MS, quando INN (=1) indica um nível ótimo de N na planta (LEMAIRE; CIAMPITTI, 2020). Baseado em estudo de Ziadi et al. (2009), que relacionaram a concentração de N foliar com o INN na cultura do milho (*Zea mays*), o valor de N ótimo na folha foi determinado como a concentração de N foliar (0,0181 g g<sup>-1</sup> MS) no qual o INN na planta foi igual a 1, sendo o mesmo procedimento realizado para definir o N ótimo no colmo (0,0096 g g<sup>-1</sup> MS). O valor de N ótimo da raiz foi considerado 0,003 g g<sup>-1</sup> MS.

Na parametrização do modelo para capim-piatã (BOSI et al., 2020), os valores de N ótimo e N máximo eram considerados iguais e, consequentemente, o modelo não simulava o consumo de luxo de N ou o aumento da concentração desse nutriente depois de se atingir o nível ótimo para o crescimento da planta. Assim sendo, identificou-se a necessidade de calibrar o modelo de forma a considerar essa dinâmica da concentração de N na planta. Para isso, o interruptor de N do modelo, que é responsável por calcular o valor de N ótimo na planta, foi calibrado de forma a considerar os valores definidos nesse trabalho para cada órgão da planta.

### 3.2.4. Teste de validação

Os dados para validação do modelo foram oriundos de dois experimentos independentes com capim-mombaça sob manejo de corte, os experimentos 3 e 4. Esses experimentos foram usados para avaliar a eficiência do modelo na simulação de crescimento do capim-mombaça em condições de sequeiro e irrigado, com ou sem adubação nitrogenada.

#### Experimento 3

O experimento 3 foi conduzido em Lavras-MG (latitude 21° 14' 43" N, longitude 44° 59' 59" O, altitude 919 m), sob condições de irrigação e sequeiro, com e sem suprimento de N. O clima é do tipo Cwa (mesotérmico úmido subtropical de inverno seco) (ALVARES et al., 2013). O solo do experimentos foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa (SANTOS et al., 2018). Os dados das variáveis físicas do solo e de dados climáticos se encontram na Tabela 4 e 5, respectivamente.

**Tabela 4.** Características físicas do solo da área do experimento 3, feito em Lavras-MG. Densidade do solo (BD), umidade do solo seco ao ar (AirDry), ponto de murcha permanente em 15 bar (LL15), capacidade de campo (DUL) e ponto de saturação (SAT). O Coeficiente de extração de água (KL), fator de exploração radicular (XF) e a fração de água acima da DUL que drena por dia (SWCON), ajustados por Bosi et al. (2020).

Profundidade	BD	AirDry	LL15	DUL	SAT	KL	XF	SWCON
m	g cm <sup>-3</sup>		mm	mm <sup>-1</sup>		fração d <sup>-1</sup>	0-1	fração d <sup>-1</sup>
0,0-0,10	1,300	0,241	0,251	0,304	0,508	0,050	1	0,900
0,10-0,20	1,400	0,241	0,251	0,304	0,471	0,050	1	0,900
0,20-0,30	1,500	0,243	0,253	0,323	0,433	0,020	1	0,900
0,30-0,40	1,500	0,253	0,253	0,323	0,433	0,050	1	0,900
0,40-0,50	1,500	0,253	0,253	0,323	0,433	0,040	1	0,900
0,50-0,60	1,500	0,253	0,253	0,323	0,433	0,030	1	0,900
0,60-0,70	1,500	0,253	0,253	0,323	0,433	0,040	1	0,900
0,70-0,80	1,500	0,253	0,253	0,323	0,433	0,030	1	0,900
0,80-0,90	1,500	0,253	0,253	0,323	0,433	0,030	1	0,900
0,90-1,00	1,550	0,253	0,253	0,323	0,414	0,040	1	0,900

**Tabela 5.** Valores médios dos dados climáticos, radiação solar global ( $R_g$ , MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), temperatura do ar média ( $T_{med}$ , °C), temperatura do ar máxima ( $T_{máx}$ , °C), temperatura do ar mínima ( $T_{mín}$ , °C), precipitação pluviométrica acumulada ( $P_a$ , mm) e velocidade do vento ( $u$ , m s<sup>-1</sup>), de cada ciclo do experimento 3, Lavras-MG, entre 2015 a 2016, usado na validação do modelo APSIM-*Tropical Pasture*.

Variável	Ciclo										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$R_g$	18,2	17,6	20,6	16,9	18,3	11,8	13,9	15,1	18,8	18,9	19,1
$T_{med}$	24,4	23,7	24,8	24,0	23,8	19,9	17,9	19,3	22,5	23,2	22,5
$T_{máx}$	29,7	28,3	30,4	29,1	29,9	25,1	24,5	26,2	29,8	29,1	27,4
$T_{mín}$	19,1	19,0	19,2	18,9	17,7	14,6	11,3	12,4	15,2	17,2	17,5
$P_a$	370,5	361,8	152,2	148,8	26,0	95,7	0,0	22,6	8,6	118,8	162,3
$u$	1,5	1,8	1,5	1,3	1,4	1,3	1,2	1,6	1,9	1,9	1,9

A semeadura foi realizada em novembro de 2014 em parcelas (4 x 7 m), em um DBC com três repetições. Foram realizadas 11 ciclo de rebrotação com duração de 28 dias (19 de novembro de 2015 a 30 abril de 2016; 29 de setembro de 2016 a 19 de novembro de 2016) no período chuvoso e 42 dias (30 abril de 2016 a 29 de setembro de 2016) no período seco (FEITOSA, 2017). As datas de início e fim dos ciclos de rebrotação se encontram na Tabela 6.

**Tabela 6.** Datas de ciclos de crescimento do experimento 3 feito em Lavras-MG, realizados entre 2015 e 2016, usado na validação do modelo APSIM-*Tropical Pasture*.

Ciclo	Data	
	Início	Fim
1	19/11/2015	21/12/2015
2	22/12/2015	21/01/2016
3	22/01/2016	25/02/2016
4	26/02/2016	27/03/2016
5	28/03/2016	29/04/2016
6	30/04/2016	10/06/2016
7	11/06/2016	15/07/2016
8	16/07/2016	26/08/2016
9	27/08/2016	28/09/2016
10	29/09/2016	23/10/2016
11	24/10/2016	18/11/2016

Ao final de cada ciclo de rebrotação foi realizado o corte de uniformização a 0,40 m do nível do solo, e em seguida as parcelas foram fertilizadas com 50 kg N ha<sup>-1</sup> e 50 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> totalizando uma aplicação de 550 kg N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, 550 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 100 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> aplicados na forma de sulfato de amônio, cloreto de potássio e superfosfato simples, respectivamente.

Foram realizadas amostragens de massa de forragem acima (em todos os ciclos de rebrotação) e abaixo da altura do resíduo (em um ciclo de rebrotação por estação do ano). As amostras foram submetidas aos mesmos procedimentos realizados no Experimento 1. Nos ciclos em que não foram realizadas mensurações no estrato abaixo da altura de corte, a massa de forragem, composição morfológica e área foliar específica do resíduo foram estimados por interpolação linear.

Os dados de interceptação da radiação foram mensurados em todos os ciclos, utilizando o LAI-2200 (LI-COR, Lincoln Nebraska, EUA). As variáveis meteorológicas foram obtidas em uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada próxima à área experimental.

#### Experimento 4

O experimento 4 foi conduzido em Sinop-MT (latitude -11°51' N, longitude 55°36' O e altitude de 370 m), sob condições de sequeiro, com e sem suprimento de N. O clima da região foi classificado como Am (clima de monções) (Alvares et al. 2013). O solo do experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico de textura argilosa (SANTOS, 2013). Os dados das variáveis físicas do solo e de clima se encontram na Tabela 7 e 8, respectivamente.

**Tabela 7.** Características físicas do solo da área do experimento 4, feito em Sinop-MT. Densidade do solo (BD), umidade do solo seco ao ar (AirDry), ponto de murcha permanente em 15 bar (LL15), capacidade de campo (DUL) e ponto de saturação (SAT). O Coeficiente de extração de água (KL), fator de exploração radicular (XF) e a fração de água acima da DUL que drena por dia (SWCON), ajustados por Bosi et al. (2020).

Profundidade	BD	AirDry	LL15	DUL	SAT	KL	XF	SWCON
m	g cm <sup>-3</sup>			mm mm <sup>-1</sup>		fração d <sup>-1</sup>	0-1	fração d <sup>-1</sup>
0-0,10	1,28	0,080	0,090	0,250	0,300	0,050	1	0,900
0,1-0,2	1,48	0,100	0,109	0,275	0,330	0,050	1	0,900
0,20-0,30	1,53	0,145	0,152	0,240	0,280	0,020	1	0,900
0,30-0,40	1,44	0,163	0,163	0,253	0,290	0,050	1	0,900
0,40-0,50	1,38	0,171	0,171	0,252	0,280	0,040	1	0,900
0,50-0,60	1,36	0,171	0,171	0,256	0,280	0,030	1	0,900
0,60-0,70	1,36	0,154	0,154	0,247	0,270	0,040	1	0,900
0,70-0,80	1,36	0,155	0,155	0,235	0,260	0,030	1	0,900
0,80-0,90	1,36	0,154	0,154	0,243	0,280	0,030	1	0,900
0,90-1,00	1,36	0,138	0,138	0,227	0,260	0,040	1	0,900

**Tabela 8.** Valores médios dos dados climáticos, radiação solar global (Rg, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), temperatura do ar média (Tmed, °C), temperatura do ar máxima (Tmáx, °C), temperatura do ar mínima (Tmín, °C), precipitação pluviométrica acumulada (Pa, mm) e velocidade do vento (u, m s<sup>-1</sup>), de cada ciclo do experimento 4, Sinop-MT, entre 2015 e 2016, usado na validação do modelo APSIM-Tropical Pasture.

Variável	Ciclo										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rg	20,8	19,0	18,2	17,8	17,8	20,9	18,4	20,1	19,8	19,2	19,2
Tméd	28,1	26,8	26,8	27,8	27,2	26,6	26,5	25,1	25,9	27,3	27,0
Tmáx	34,0	31,6	31,6	33,2	32,1	33,3	33,7	34,6	34,6	34,2	32,6
Tmín	22,2	22,1	22,1	22,4	22,2	19,9	19,4	15,5	17,2	20,5	21,5
Pa	116,1	316,5	210,1	179,3	248,4	85,9	0,4	0,0	85,1	186,9	347,5
u	1,7	1,6	1,6	1,6	1,4	1,4	1,3	1,7	2,0	1,5	1,7

Esse experimento foi conduzido em Sinop-MT, em condições de sequeiro. A semeadura foi realizada em janeiro de 2015 em parcelas (4 x 7 m), em um DBC com três repetições (SANTOS, 2016). Ao todo, foram avaliados 11 ciclo de rebrotação com duração de 28 dias (19 de novembro de 2015 a 10 março de 2016; e de 8 de setembro a 17 de novembro de 2016) no período chuvoso e 42 dias (10 de março a 8 setembro de 2016) no período seco. As datas

de início e fim dos ciclos de rebrotação se encontram na Tabela 9. Os demais procedimentos realizados foram semelhantes aos descritos no experimento 3.

**Tabela 9.** Dados de ciclos de crescimento do experimento 4 feito em Sinop-MT, realizados entre 2015 e 2016, usado na validação do modelo APSIM-Tropical Pasture.

Ciclo	Data	
	Início	Fim
1	19/11/2015	17/12/2015
2	18/12/2015	14/01/2016
3	15/01/2016	11/02/2016
4	12/02/2016	09/03/2016
5	10/03/2016	06/04/2016
6	07/04/2016	04/05/2016
7	05/05/2016	15/06/2016
8	16/06/2016	27/07/2016
9	28/07/2016	07/09/2016
10	08/09/2016	19/10/2016
11	20/10/2016	16/11/2016

### 3.2.5. Análise do desempenho do modelo

Os índices estatísticos utilizados para avaliar o desempenho do modelo quanto a precisão e acurácia da estimativa da massa de forragem viva, da partição entre os órgãos da parte aérea da planta, IAF e AFE para todas as condições ambientais avaliadas. Segue abaixo os índices estatísticos e critérios que foram adotados seguindo a classificação de Bosi et al. (2020):

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) avaliou a precisão da estimativa do modelo para cada variável avaliada através da regressão linear entre valores observados (O) e estimados (E). O  $R^2$  foi classificado como insatisfatório ( $R^2 \leq 0,6$ ), satisfatório ( $0,6 < R^2 \leq 0,7$ ), bom ( $0,7 < R^2 \leq 0,8$ ) e muito bom ( $R^2 > 0,8$ );

Índice de concordância de Willmott (1981) (d), o qual quantifica a acurácia de modelo, que varia de 0 a 1, e foi calculado utilizando a Equação 5. O d quantifica a precisão do modelo e foi classificado como insatisfatório ( $d \leq 0,75$ ), satisfatório ( $0,75 < d \leq 0,85$ ), bom ( $0,85 < d \leq 0,95$ ) e muito bom ( $d > 0,95$ ):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

Índice de eficiência da modelagem de Nash-Sutcliffe (NSE) descreve a acurácia do modelo, varia de  $-\infty$  a 1, e foi calculado de acordo com a Equação 6. O desempenho do modelo foi classificado de acordo com os critérios Moriasi et al. (2007), considerado como insatisfatório ( $NSE \leq 0,5$ ), satisfatório ( $0,5 < NSE \leq 0,65$ ), bom ( $0,65 < NSE \leq 0,75$ ) e muito bom ( $NSE > 0,75$ ):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

Erro médio (ME), como indicador de viés na simulação:

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (7)$$

Erro absoluto médio (MAE):

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (8)$$

Raiz do quadrado médio do erro (RQME):

$$RQME = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2\right]} \quad (9)$$

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Calibração do APSIM-Tropical Pasture

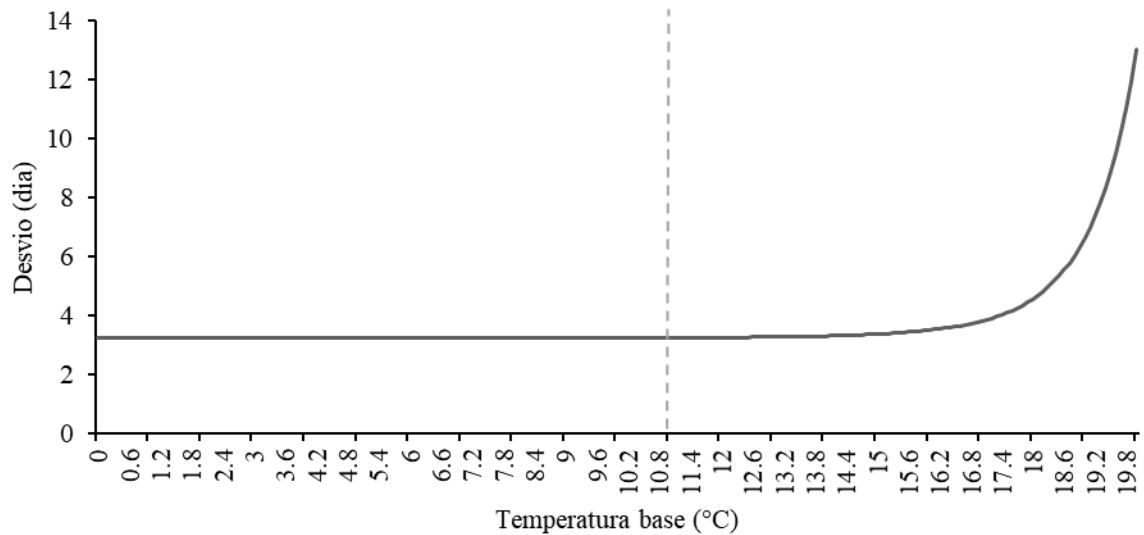
Na simulação em que foram utilizados os parâmetros iniciais do APSIM-Tropical Pasture calibrados para o capim-piatã, o modelo não foi capaz de simular satisfatoriamente a massa de forragem viva do capim-mombaça sob condição irrigada ( $R^2= 0,54$ ;  $d= 0,80$ , e  $NSE= 0,40$ ) (Tabela 10). Contudo, a estimativa da massa de forragem viva sob condições de sequeiro foi estimada com precisão boa ( $R^2= 0,71$ ) e acurácia de satisfatória a boa ( $d= 0,91$  e  $NSE= 0,68$ ) (Tabela 10). As estimativas também não foram satisfatórias para a partição de MS para folha, colmo e coroa na condição irrigada (Tabela 10). Na condição de sequeiro, apenas a massa de colmo foi eficientemente estimada ( $R^2= 0,68$ ;  $d= 0,80$ , e  $NSE= 0,54$ ). O modelo também não foi capaz de estimar o IAF e a AFE satisfatoriamente (Tabela 10).

**Tabela 10.** Índices estatísticos e erros da estimativa massa de forragem viva (MFV), massa de lâmina foliar (Folha), massa de colmo (Colmo), massa de coroa (Coroa) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ), dos experimentos 1 e 2 usando os parâmetros iniciais do APSIM-Tropical Pasture parametrizado para capim-piatã (Bosi et al., 2020).  $R^2$  = coeficiente de determinação,  $d$  = índice de concordância de Willmott,  $NSE$  = eficiência de Nash-Sutcliffe,  $ME$  = erro médio ( $\text{g m}^{-2}$ ),  $EMA$  = erro médio absoluto ( $\text{g m}^{-2}$ ),  $RQME$  = raiz do quadrado médio do erro ( $\text{g m}^{-2}$ ).

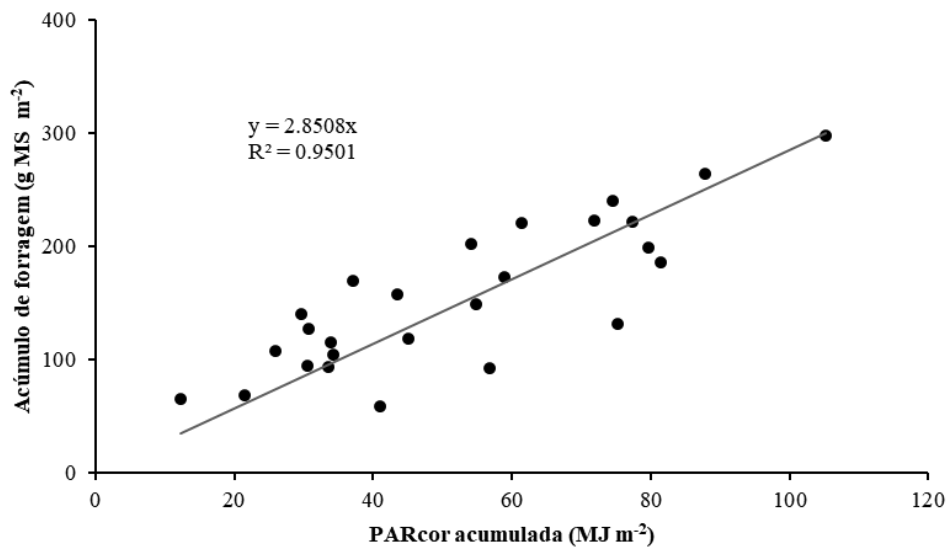
Variável	Conjunto do Exp. 1 e 2 (Manejado sob corte e irrigado)						
	N	$R^2$	$d$	$NSE$	EM	EAM	RQME
MFViva	62	0,54	0,80	0,40	52,82	94,10	110,12
Folha	62	0,54	0,73	0,29	-58,74	71,30	102,39
Colmo	59	0,30	0,71	-0,17	7,58	22,53	30,24
Coroa	32	0,16	0,16	-68,40	87,39	87,39	94,35
IAF	49	0,44	0,79	0,44	-0,04	0,99	1,23
AFE	59	-	-	-1,08	-	-	-
Variável	Conjunto do Exp. 1 e 2 (Manejado sob corte e sequeiro)						
	N	$R^2$	$d$	$NSE$	EM	EAM	RQME
MFViva	64	0,71	0,91	0,68	-6,50	64,67	78,75
Folha	63	0,70	0,74	0,08	-85,07	87,07	105,40
Colmo	63	0,68	0,90	0,54	1,61	18,73	26,58
Coroa	35	0,34	0,34	-17,88	64,16	64,16	70,61
IAF	60	0,64	0,79	0,33	-0,94	1,09	1,39
AFE	64	0,29	0,73	0,10	-	-	-



Com o propósito de melhorar a estimativa do APSIM-*Tropical Pasture* para simular o crescimento de capim-mombaça foram feitos ajustes em alguns parâmetros (Tabela 11, 12, 13 e 14). A  $T_b$  foi ajustada de 8,9°C para 10,8°C para o capim-mombaça (Figura 1). O valor de  $k$  foi ajustado de 0,65 para 0,62 e a AFE padrão de 0,02 para 0,021  $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$  (Tabela 11). A eficiência de uso da PAR da parte aérea do dossel forrageiro foi ajustada de 2,31  $\text{g MJ}^{-1}$  para 2,85  $\text{g MJ}^{-1}$  (Figura 2) e a RUE para planta inteira de 1,44  $\text{g MJ}^{-1}$  para 1,78  $\text{g MJ}^{-1}$ , considerando que 20% dos fotoassimilados são direcionados para o crescimento radicular (Tabela 11)



**Figura 1.** Estimativa da temperatura base para *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça pelo método da menor variabilidade de Arnold (1959).



**Figura 2.** Relação entre o acúmulo de biomassa de forragem da parte aérea e a PAR acumulada, corrigida pelo fator térmico.

**Tabela 11.** Parâmetros do submodelo de folha do APSIM-*Tropical Pasture* calibrados para *Megathyrus maximus* cv. Mombaça com dados dos experimentos 1 e 2, conduzidos entre 2010 e 2012 em São Carlos-SP. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma dada variável (x) e seus valores do fator correspondente (y).

Parâmetro	Unidade	Valor inicial	Valor ajustado
Massa inicial da planta	g planta <sup>-1</sup>	0,1	0,1
Massa inicial da folha	g planta <sup>-1</sup>	0,1	0,1
Fração estrutural de folha	0-1	1	1
Coefficiente de extinção de luz (k)		0,65	0,62
Conc. máxima de N na folha	g g <sup>-1</sup>	0,021	0,0367
Conc. mínima de N na folha	g g <sup>-1</sup>	0,005	0,0087
Interruptor da demanda de N	0-1	1	0,336
Fator de realocação de N	0-1	0,5	0,5
Tempo para queda da folha	dias	30	30
RUE da planta inteira	g MJ <sup>-1</sup>	1,44	1,78
Fator de temperatura (Ft)	x: temperatura (°C)	x: 8,9; 30,2; 40; 45	x: 10,8; 30; 35; 45
	y: valor de Ft	y: 0; 1; 1; 0	y: 0; 1; 1; 0
Fator déf. press. de vapor (Fvpd)	x: VPD (kPa)	x: 0; 10; 50	x: 0; 10; 50
	y: valor de Fvpd	y: 0; 1	y: 1; 1; 1
			x: 0,0087; 0,0181;
Fator de Nitrogênio (Fn)	x: conc. de N (g g <sup>-1</sup> )	x: 0,005; 0,021	0,0367
	y: valor de Fn	y: 0; 1	y: 0; 1; 1
Fator de déficit hídrico (Fw)	x: suprimento/demanda	x: 0; 1	x: 0; 0,4; 0,75; 1
	y: valor Fw	y: 0; 1	y: 0; 0,6; 0,9; 1
Função morte de folha por geada	x: temperatura mín. (°C)	x: 0; 2	x: 0; 2
	y: valor do fator	y: 1; 0	y: 1; 0
Tempo de vida da folha(LRT)	dias	80	80
Área foliar específica padrão	x: idade da planta (anos)	x: 0,0; 0,3; 0,7	x: 0,0; 0,4; 0,7
	y: AFE (m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup> )	y: 0,015; 0,018; 0,020	y: 0,015; 0,018; 0,021
Fator de água sobre AFE	x: Fw da folha	x: 0; 0,8; 1	x: 0; 0,8; 1
	y: valor do fator	y: 0; 0,4; 1	y: 0; 0,6; 1
Concentração de C na folha	g g <sup>-1</sup>	0,4	0,4

No submodelo de folha foram ajustados os parâmetros de Ft (com Tb de 10,8°C; TO1 e TO2 em 30 e 35°C), k, Fw, AFE padrão, RUE, Fn (com CN<sub>máx</sub> = 0,0367 e CN<sub>mín</sub> = 0,0087) e do interruptor de demanda de N (0,336) (Tabela 11). Na raiz foram modificados os valores de concentração de N máxima e mínima (CN<sub>máx</sub> = 0,0186 e CN<sub>mín</sub> = 0,0023) e o interruptor de demanda de N (0,043) (Tabela 12). Nos submodelos de colmo e coroa foram ajustados os valores de CN (CN<sub>máx</sub> = 0,0292 e CN<sub>mín</sub> = 0,0045) e o interruptor de demanda de N (0,206), sendo que ambos os parâmetros foram adotados com os mesmos valores para colmo e coroa, uma vez que não foi realizada a diferenciação da coroa na separação morfológica.

**Tabela 12.** Parâmetros do submodelo de raiz do APSIM-*Tropical Pasture* calibrados para *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça, com dados do experimento 1 e 2 conduzido entre 2010 e 2012 em São Carlos-SP. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma dada variável (x) e seus valores do fator correspondente (y).

Parâmetro	Unidade	Valor inicial	Valor ajustado
Massa inicial de raízes	g plant <sup>-1</sup>	0,02	0,02
Comprimento específico de raiz	m g <sup>-1</sup>	100	100
Velocidade de crescimento da raiz	mm d <sup>-1</sup>	20	20
Taxa de senescência da raiz	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0,001	0,001
Concentração máxima de N	g g <sup>-1</sup>	0,0186	0,0186
Concentração mínima de N	g g <sup>-1</sup>	0,0023	0,0023
Interruptor da demanda de N	(0-1)	1	0,043
Absorção diária de N máxima	g plant <sup>-1</sup>	6	6
Profundidade máxima da raiz	mm	10000	10000
Fração estrutural da raiz	(0-1)	0,8	0,8
Modificador absorção de água (KL)	x: IAF	x: 0; 3; 10	x: 0; 3; 10
	y: valor do fator	y: 1; 1; 1	y: 1; 1; 1
Modificador absorção de NO <sub>3</sub> (KNO <sub>3</sub> )	x: densidade de raízes	x: 0; 0,003	x: 0; 0,003
	y: absorção de NO <sub>3</sub>	y: 0,3; 0,3	y: 0,3; 0,3
Modificador absorção de NH <sub>4</sub> (KNH <sub>4</sub> )	x: densidade de raízes	x: 0; 0,003	x: 0; 0,003
	y: absorção de NH <sub>4</sub>	y: 0; 0	y: 0; 0
Concentração de carbono nas raízes	g g <sup>-1</sup>	0,4	0,4

**Tabela 13.** Parâmetros do submodelo de colmo e coroa do APSIM-*Tropical Pasture* calibrados para *Megathyrus maximus* cv. Mombaça, com dados dos experimentos 1 e 2 conduzido entre 2010 e 2012 em São Carlos-SP. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma dada variável (x) e seus valores do fator correspondente (y).

Parâmetro	Unidade	Valor inicial	Valor ajustado
Massa inicial de colmo	g m <sup>-2</sup>	0	0
Fração estrutural de colmo	(0-1)	1	1
Taxa de desprendimento de colmo	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0,,1	0,01
Fator de realocação do N do colmo	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0	0
Fator retranslocação do N do colmo	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0	0
Fator retranslocação da MS do colmo	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0	0
Concentração máxima do N do colmo	g g <sup>-1</sup>	0,003	0,0292
Concentração mínima do N do colmo	g g <sup>-1</sup>	0,001	0,0045
Eficiência conversão de DM no colmo	0-1	1	1
Interruptor da demanda de N no colmo	0-1	1	0,206
Taxa de senescência de colmo	x: estágio fenológico y: taxa de senescência	x: 0; 5; 6; 7 y: 0,005; 0,005; 0,015; 0,015	x: 0; 5; 6; 7 y: 0,005; 0,005; 0,015; 0,015
Concentração de carbono do colmo	g g <sup>-1</sup>	0,4	0,4
Massa inicial de coroa	g m <sup>-2</sup>	0	0
Fração estrutural de coroa	(0-1)	0,5	0,5
Taxa de desprendimento da coroa	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0,01	0,01
Fator de realocação do N da coroa	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0	0,5
Fator retranslocação do N da coroa	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0	0
Fator retranslocação da MS da coroa	Fração (0-1) d <sup>-1</sup>	0	0
Concentração máxima de N na coroa	g g <sup>-1</sup>	0,003	0,0292
Concentração mínima de N na coroa	0-1	0,001	0,0045
Eficiência conversão de DM na coroa	0-1	1	1
Interruptor da demanda de N na coroa	0-1	1	0,206
Taxa de senescência de coroa	x: estágio fenológico y: taxa de senescência	x: 0; 5; 6; 7 y: 0,005; 0,005; 0,015; 0,015	x: 0; 5; 6; 7 y: 0,005; 0,005; 0,015; 0,015
Concentração de carbono na coroa	g g <sup>-1</sup>	0,4	0,4

Os parâmetros de partição de MS foram ajustados para o capim-mombaça, com a partição de MS regulada pelo fotoperíodo (Tabela 14). A avaliação do meristema apical obtida no experimento 1 indica que a indução do florescimento ocorreu quando o fotoperíodo reduziu para 11,8 h e permaneceu até o fotoperíodo de 10,7 h. A partição de MS para a raiz foi mantida em 20% da RUE durante o período vegetativo. No período de florescimento houve redução na partição de MS para raiz, chegando a ser nula. Por outro lado, houve incremento da partição de MS para colmo e coroa durante o período de florescimento (Tabela 14). Todos os demais parâmetros de cultivar foram mantidos iguais aos parametrizados por Bosi et al. (2020) para o capim-piatã.

**Tabela 14.** Partição da matéria seca entre os órgãos vegetais em função do fotoperíodo e estágio fenológico do modelo APSIM-*Tropical Pasture* parametrizado inicialmente por Bosi et al. (2020) e calibrado para *Megathyrus maximus* cv. Mombaça com dados dos experimentos 1 e 2, conduzidos entre 2010 e 2012 em São Carlos-SP.

Fase	Fotoperíodo	Estádio Fenológico	Partição			
Unidade	Horas	Fração (0-1)				
Parâmetros iniciais						
			Folha	Raíz	Colmo	Coroa
0		Germinação	0,50	0,33	0,09	0,08
1		Emergência	0,55	0,25	0,10	0,10
2		Juvenil	0,55	0,20	0,10	0,10
3	13,00	Vegetativo1	0,55	0,20	0,15	0,10
4	12,50	Reprodutivo1	0,55	0,00	0,25	0,20
5	11,40	Reprodutivo2	0,55	0,00	0,25	0,20
6	11,00	Reprodutivo3	0,55	0,00	0,35	0,10
7	10,70	Vegetativa2	0,55	0,00	0,15	0,10
Parâmetros ajustados						
0		Germinação	0,55	0,45	0,00	0,00
1		Emergência	0,60	0,32	0,05	0,03
2		Juvenil	0,65	0,20	0,12	0,03
3	11,80	Vegetativo1	0,65	0,20	0,11	0,04
4	10,83	Reprodutivo1	0,65	0,07	0,18	0,10
5	10,82	Reprodutivo2	0,65	0,07	0,18	0,10
6	10,81	Reprodutivo3	0,65	0,00	0,25	0,10
7	10,70	Vegetativa2	0,65	0,23	0,10	0,02

A calibração do APSIM-*Tropical Pasture* para capim-mombaça resultou em melhorias na simulação do modelo para esta espécie (Tabela 15), em comparação à parametrização inicial feita por Bosi et al. (2020) (Tabela 10). O que resultou na otimização da estimativa de crescimento e produtividade do capim-mombaça, por meio de dados obtidos dos experimentos 1 e 2, conduzidos sob manejo de corte em condições irrigada e em sequeiro, com suprimento de N via fertilização mineral, entre 2010 e 2012 em São Carlos-SP. A massa de forragem viva foi estimada com precisão satisfatória e boa ( $R^2$  de 0,64 e 0,77) e acurácia boa ( $d$  de 0,88 e 0,93, e NSE de 0,63 a 0,75) (Tabela 15). Quando analisados os tratamentos em conjunto, a massa de forragem viva foi estimada com precisão boa ( $R^2=0,72$ ) e acurácia muito boa ( $d=0,96$  e NSE= 0,91) e apresentou erros baixos, o mesmo observado quando analisadas as condições de manejo em separado, demonstrando a robustez do modelo (Tabela 15 e Figura 3).

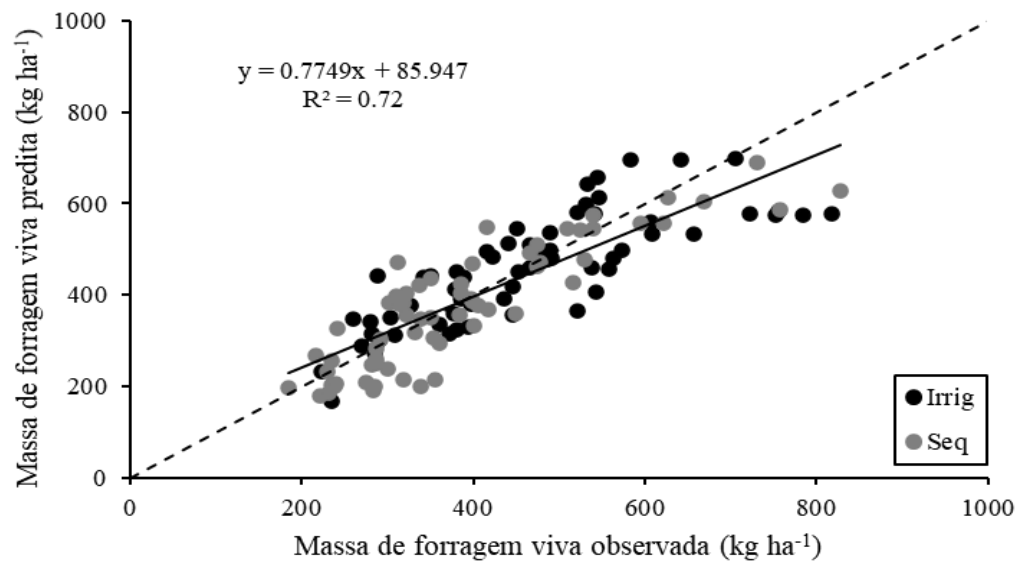
A partição de matéria seca entre órgãos da parte aérea do capim-mombaça apresentou diferenças entre a precisão e acurácia para as condições irrigada e sequeiro (Tabela 15). A partição para folhas foi estimada com precisão satisfatória e boa ( $R^2=0,64$  e 0,76) e acurácia boa ( $d=0,88$  e 0,92 e NSE= 0,63 e 0,71) (Tabela 15). A simulação para o colmo apresentou precisão e acurácia insatisfatória ( $R^2=0,37$ ,  $d=0,76$  e NSE= 0,16) para o manejo sob irrigação, e em sequeiro a precisão foi satisfatória ( $R^2=0,66$ ) e acurácia boa ( $d=0,89$  e NSE= 0,60) (Tabela 15). A simulação de coroa apresentou precisão e acurácia insatisfatória ( $R^2=0,14$  e 0,13,  $d=0,77$  e 0,61, e NSE= 0,04 e -0,25) para ambas as condições avaliadas (Tabela 15). Apesar disso, a estimativa da massa de forragem viva não foi grandemente afetada, resultando em uma satisfatória performance do modelo.

O IAF foi estimado com precisão satisfatória ( $R^2=0,64$  e 0,72) e acurácia satisfatória a boa ( $d=0,85$  e 0,92 e NSE= 0,41 e 0,69) (Tabela 15). A AFE foi simulada com precisão e acurácia insatisfatória ( $R^2=0,14$  e 0,13,  $d=0,77$

e 0,61, e NSE= 0,04 e -0,25), porém, pode-se observar que o modelo teve a tendência de captar os efeitos ambientais na série temporal (Figura 5).

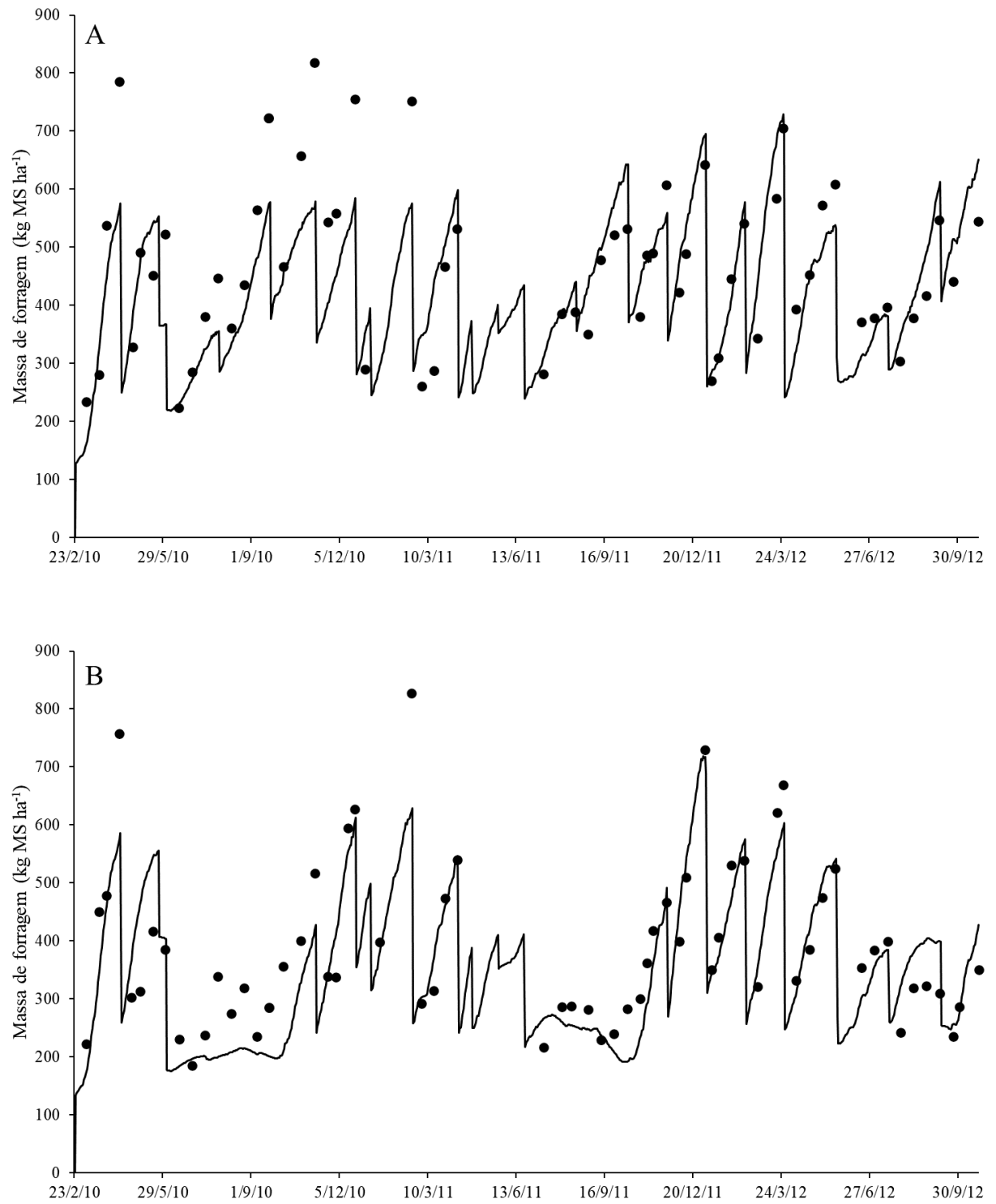
**Tabela 15.** Índices estatísticos e erros da estimativa massa de forragem viva (MFV), massa de lâmina foliar (Folha), massa de colmo (Colmo), massa de coroa (Coroa) ( $\text{g m}^{-2}$ ), índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ ), dos experimentos 1 e 2 usados na calibração do APSIM-*Tropical Pasture* para *Megathyrus maximus* cv. Mombaça sob manejo de corte em condições irrigada e sequeiro que foram conduzidos em São Carlos-SP entre 2010 e 2012.  $R^2$  = coeficiente de determinação, d = índice de concordância de Willmott, NSE = eficiência de Nash-Sutcliffe, ME= erro médio ( $\text{g m}^{-2}$ ), EMA = erro médio absoluto ( $\text{g m}^{-2}$ ), RQME = raiz do quadrado do erro médio ( $\text{g m}^{-2}$ ).

Variável	Conjunto do Exp. 1 e 2 (Manejado sob corte e irrigado)						
	N	$R^2$	d	NSE	EM	EMA	RQME
MFV	62	0,64	0,88	0,63	-7,43	67,65	85,77
Folha	62	0,64	0,88	0,63	-12,82	55,58	73,49
Colmo	59	0,37	0,76	0,16	-6,28	21,03	25,59
Coroa	32	0,14	0,77	0,04	3,26	12,25	15,16
IAF	49	0,64	0,85	0,41	0,76	1,03	1,26
AFE	59	-	0,41	-1,38	-	-	-
Conjunto do Exp. 1 e 2 (Manejado sob corte em sequeiro)							
MFV	64	0,77	0,93	0,75	-12,46	54,64	69,56
Folha	63	0,76	0,92	0,71	-24,66	48,12	58,85
Colmo	63	0,66	0,89	0,60	-4,46	17,94	24,56
Coroa	35	0,13	0,61	-0,25	7,18	14,53	18,17
IAF	60	0,72	0,92	0,69	-0,20	0,72	0,95
AFE	64	0,29	0,73	-0,06	-	-	-
Conjunto de todos os tratamentos dos Exp. 1 e 2							
MFV	126	0,72	0,96	0,91	-9,98	33,29	79,43
Folha	126	0,76	0,98	0,91	-24,66	48,12	58,85
Colmo	126	0,66	1,00	0,98	-4,46	17,94	24,56
Coroa	70	0,13	0,61	-0,25	7,18	14,53	18,17
IAF	120	0,72	0,92	0,70	-0,20	0,72	0,95
AFE	126	0,72	0,96	0,91	-9,98	33,29	79,43



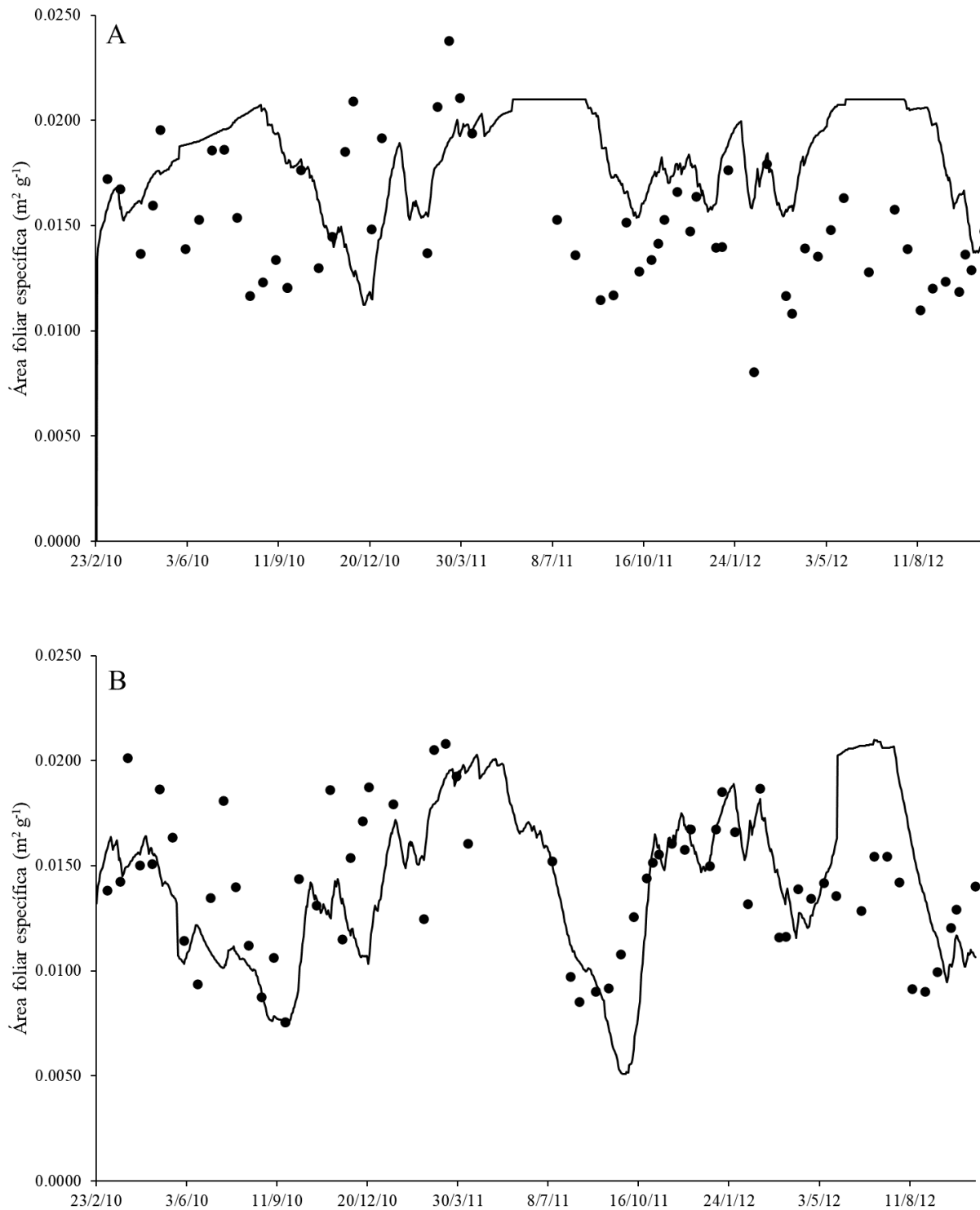
**Figura 3.** Relações entre massa de forragem viva observada e predita para os dois experimentos juntos usados na calibração do APSIM-*Tropical Pasture* para *Megathyrus maximus* cv Mombaça sob manejo de corte em condição irrigada e sequeiro em São Carlos-SP, entre 2010 e 2012. Seq = sequeiro e Irrig= irrigado.

O modelo conseguiu simular de forma satisfatória os efeitos do manejo e das condições ambientais impostas sob o capim-mombaça (Figura 4). As séries temporais com dados observados e estimados de massa de forragem viva, produzida ao longo dos ciclos de rebrotação em condições irrigada e sequeiro se encontram na Figura 4. A simulação do crescimento durante o estágio reprodutivo, que ocorreu nos ciclos 1, 2 e 8 no Exp. 1 e 1 e 8 no Exp. 2, apresentou uma boa performance para ambas as condições analisadas (Figura 4).



**Figura 4.** Séries temporais da massa de forragem viva estimada (—) e observada (●) para os experimentos utilizados na calibração do modelo *APSIM-Tropical Pasture* para capim Mombaça, manejado por corte sob condições irrigada (A) e sequeiro (B).





**Figura 5.** Séries temporais da área foliar específica estimada (—) e observada (●) para os experimentos utilizados na calibração do modelo APSIM-*Tropical Pasture* para capim Mombaça, manejado por corte sob condições irrigada (A) e sequeiro (B).

### 3.3.2. Teste de validação do modelo

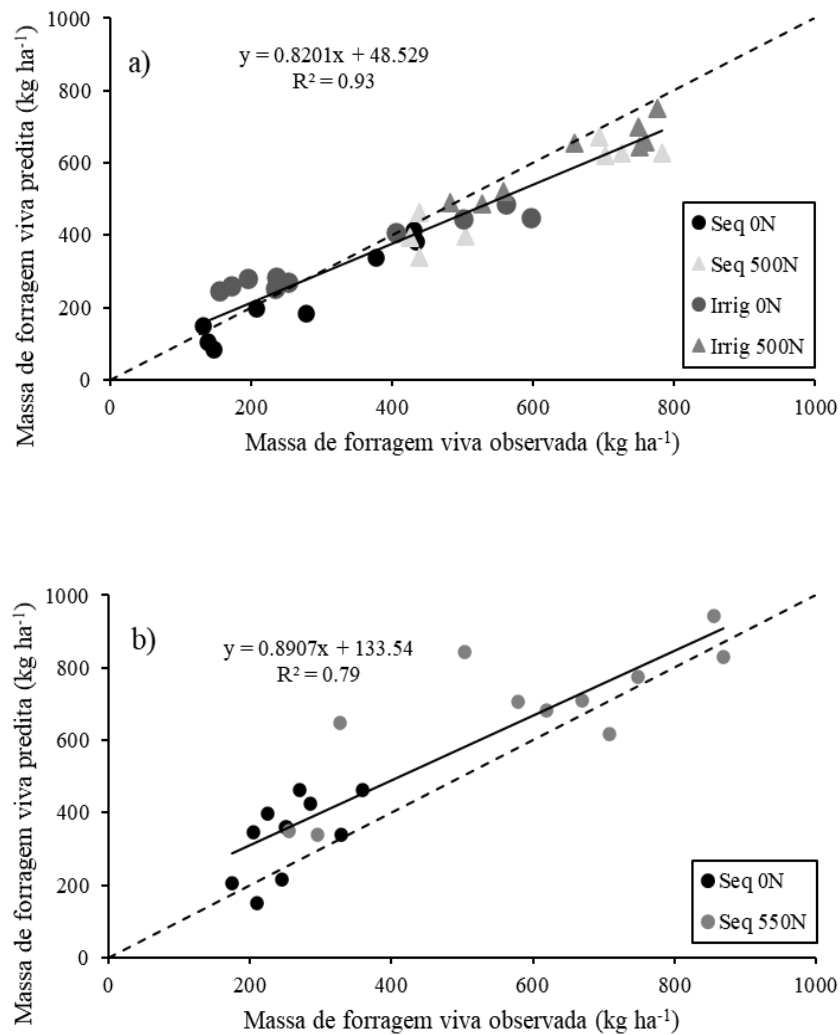
No teste de validação do modelo, foram utilizados para simular o crescimento de capim-mombaça dados dos Exp. 3 e Exp. 4, nos quais o capim-mombaça foi manejado por corte sob condições irrigada e sequeiro, com e

sem suprimento de N via fertilização. Ao analisar todos os tratamentos em conjunto para cada experimento, obteve-se uma estimativa de massa de forragem viva com precisão muito boa ( $R^2 = 0,93$  e  $0,82$ ) e acurácia muito boa ( $d = 0,97$  e  $0,89$  e  $NSE = 0,89$  e  $0,61$ ) (Tabela 16 e Figura 6A e B), comprovando a capacidade de simulação do modelo para diferentes cenários avaliados. Os erros associados a estimativa de massa de forragem viva do Exp. 3 ( $EM = -33,09$  g  $m^{-2}$ ,  $EMA = 57,10$  g  $m^{-2}$  e  $RQME = 69,90$  g  $m^{-2}$ ) (Tabela 16) foram pequenos e próximos aos erros observados na simulação dos experimentos utilizados na fase de calibração quando analisados em conjunto ( $EM = -9,98$  g  $m^{-2}$ ,  $EMA = 33,29$  g  $m^{-2}$  e  $RQME = 79,43$  g  $m^{-2}$ ) (Tabela 15). Contudo, os erros associados a estimativa de massa de forragem no Exp. 4 ( $EM = -132,85$  g  $m^{-2}$ ,  $EMA = 148,29$  g  $m^{-2}$  e  $RQME = 179,28$  g  $m^{-2}$ ) foram maiores que os observados no Exp. 1, 2 e 3. Quanto à partição de matéria seca entre os órgãos da parte aérea, a folha foi estimada com precisão muito boa e boa ( $R^2 = 0,83$  e  $0,79$ ) e acurácia boa ( $d = 0,91$  e  $NSE = 0,71$  e  $0,62$ ) em ambos os Exp. 3 e 4. O colmo foi estimado com precisão muito boa e boa ( $R^2 = 0,88$  e  $0,71$ ) e acurácia boa ( $d = 0,91$  e  $0,90$  e  $NSE = 0,74$  e  $0,70$ ) (Tabela 16). A coroa, assim como ocorrido na calibração, teve uma estimativa insatisfatória no Exp.3. No Exp.4, observou-se que a massa de coroa foi estimada com precisão boa ( $R^2 = 0,75$ ) e acurácia boa ( $d = 0,92$  e  $NSE = 0,69$ ) (Tabela 16). As estimativas de partição para folha, colmo e coroa no Exp.4 apresentaram maiores erros na estimativa em comparação aos demais experimentos (Tabela 16).

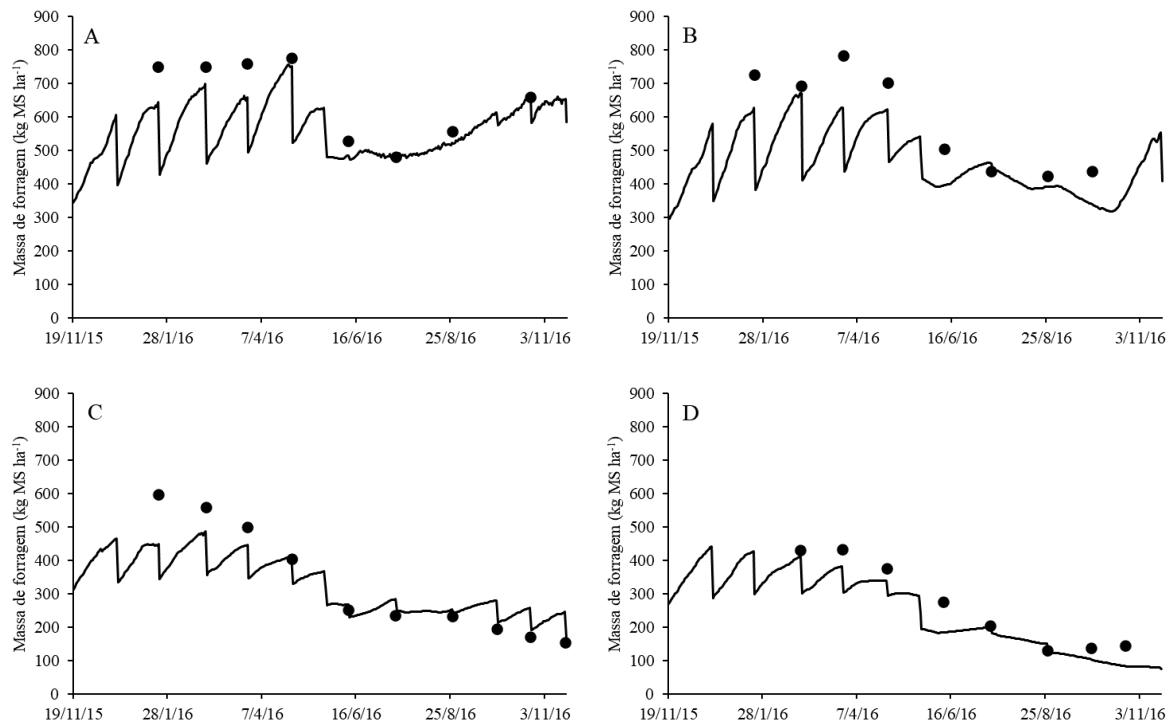
O IAF foi estimado com precisão satisfatória ( $R^2 = 0,60$ ) e acurácia boa ( $d = 0,87$  e  $NSE = 0,59$ ). O AFE foi simulada com precisão e acurácia insatisfatória ( $R^2 = 0,04$ ,  $d = 0,21$  e  $NSE = -9,92$ ) para o Exp. 3, semelhante ao observado na calibração do modelo (Tabela 16 e Figura 8). No entanto, a estimativa da AFE obtida no Exp. 4 apresentou uma precisão satisfatória e acurácia boa ( $R^2 = 0,64$ ,  $d = 0,85$  e  $NSE = 0,61$ ), porém associada a erros grandes ( $EM = -0,18$  m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>,  $EMA = 1,29$  m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> e  $RQME = 1,60$  m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>) (Tabela 16 e Figura 10).

**Tabela 16.** Índices estatísticos e erros da estimativa massa de forragem viva (MFV), massa de lâmina foliar (Folha), massa de colmo (Colmo), massa de coroa (Coroa) (kg ha<sup>-1</sup>), índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE) (m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>), dos experimentos usados na validação do APSIM-Tropical Pasture de *Megathyrus maximus* cv. Mombaça sob manejo de corte, com e sem adubação nitrogenada em condições irrigada e sequeiro. Os experimentos 3 e 4 que foram conduzidos em Lavras-MG e Sinop-MT, entre 2015 e 2016.  $R^2$  = coeficiente de determinação,  $d$  = índice de concordância de Willmott,  $NSE$  = eficiência de Nash-Sutcliffe,  $ME$  = erro médio (g  $m^{-2}$ ),  $EMA$  = erro médio absoluto (g  $m^{-2}$ ),  $RQME$  = raiz do quadrado do erro médio (g  $m^{-2}$ ).

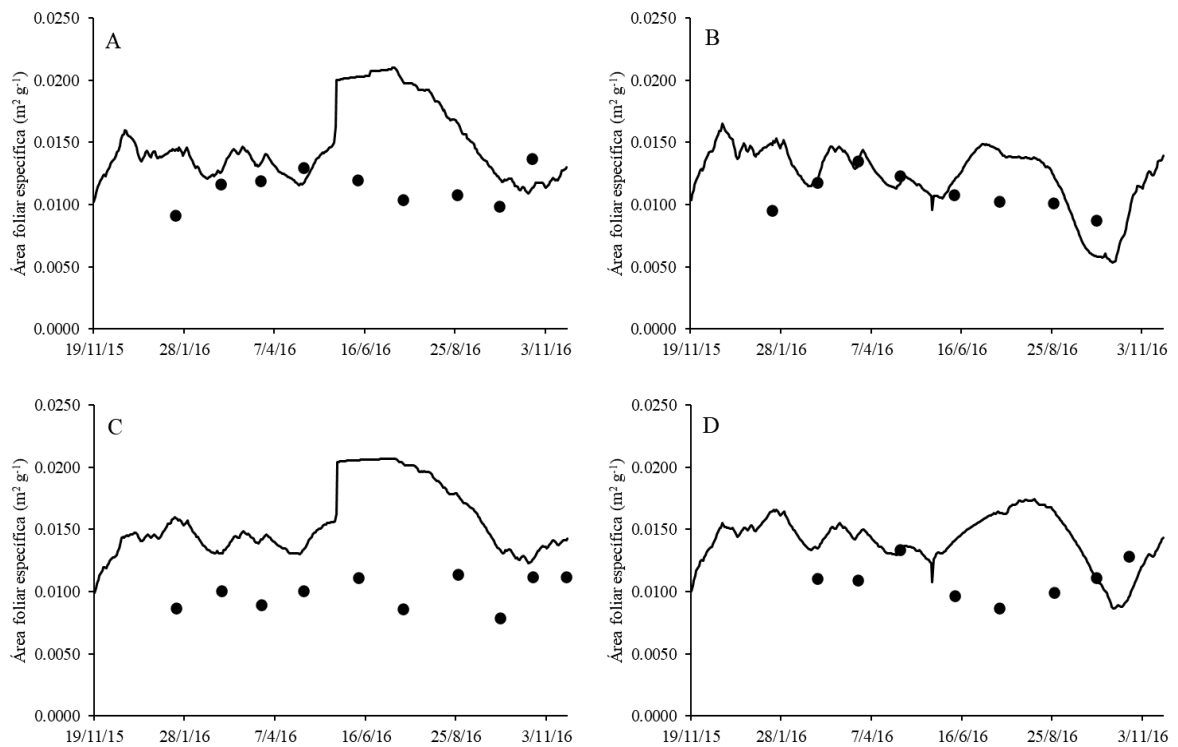
Variável	Experimento 3 (todos os tratamentos juntos )						
	N	R <sup>2</sup>	d	NSE	EM	EMA	RQME
MFV	34	0,93	0,97	0,89	-33,09	57,10	69,90
Folha	34	0,83	0,91	0,71	-46,02	59,80	73,21
Colmo	34	0,88	0,91	0,74	-23,13	33,94	45,28
Coroa	34	0,04	0,48	-0,16	-20,24	31,23	55,20
IAF	33	0,60	0,87	0,59	0,11	0,97	1,13
AFE	35	0,04	0,21	-9,92	-	-	-
Experimento 4 (todos os tratamentos juntos)							
MFV	22	0,79	0,91	0,62	87,63	107,84	137,38
Folha	22	0,71	0,90	0,70	-15,52	71,36	82,62
Colmo	22	0,75	0,92	0,69	13,92	31,73	35,47
Coroa	22	0,60	0,29	-37,67	89,22	89,22	97,59
IAF	22	0,64	0,85	0,61	-0,18	1,29	1,60
AFE	18	0,64	0,85	0,61	-0,18	1,29	1,60



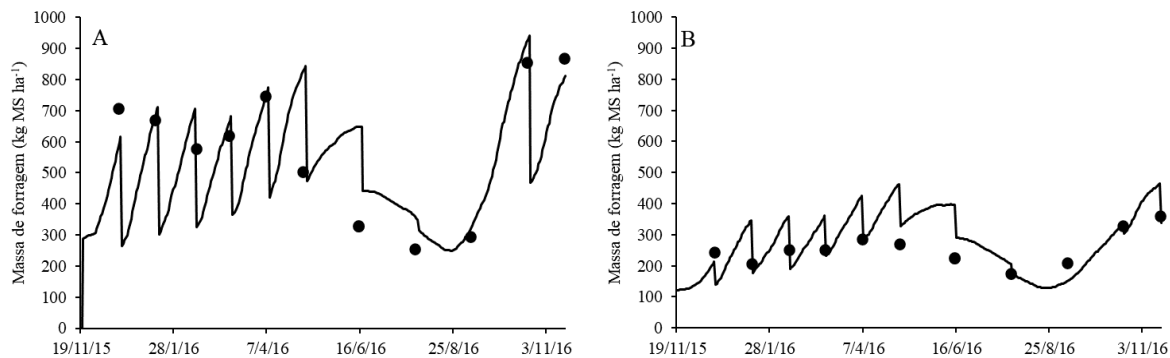
**Figura 6.** Relações entre massa de forragem viva observada e estimada para os experimentos usados na validação do APSIM-*Tropical Pasture* para *Megathyrus maximus* cv Mombaça em (a) Lavras-MG sob manejo de corte em condição irrigada e sequeiro, com e sem adubação nitrogenada e em (b) Sinop-MT sob manejo de corte em sequeiro, com e sem adubação nitrogenada. Os experimentos foram conduzidos entre 2015 e 2016. Seq 0N = sequeiro sem adubação nitrogenada (0 kg de N ha<sup>-1</sup> ano), Seq 550N= sequeiro com adubação nitrogenada (550 kg de N ha<sup>-1</sup> ano), Irrig 0N= irrigado sem adubação nitrogenada (0 kg de N ha<sup>-1</sup> ano) e Irrig 0N= irrigado com adubação nitrogenada (550 kg de N ha<sup>-1</sup> ano).



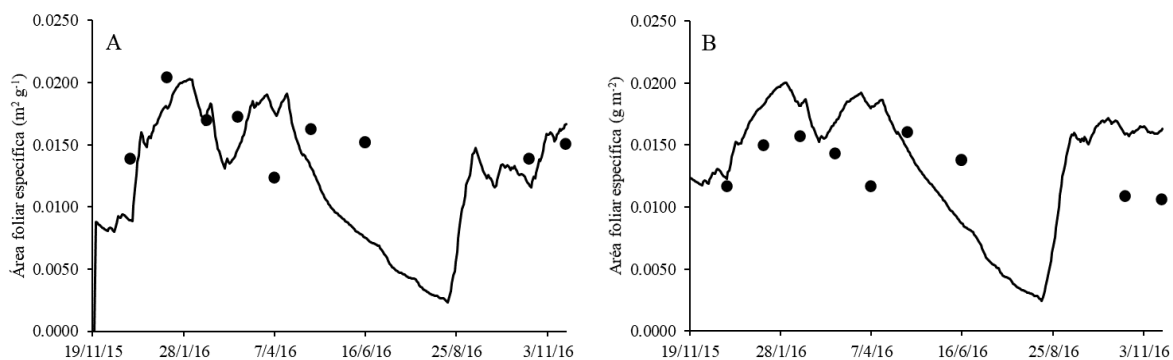
**Figura 7.** Séries temporais da massa de forragem viva estimada (—) e observada (●) para os experimentos utilizados na validação do modelo APSIM-*Tropical Pasture* para capim Mombaça utilizando dados de Lavras-MG, entre 2015 e 2016, manejado por corte e sob condição irrigada (A) ou sequeiro (B), fertilizado com 550 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e sob condição irrigada (C) ou sequeiro (D), sem aplicação de N.



**Figura 8.** Séries temporais da área foliar específica estimada (—) e observada (●) para os experimentos utilizados na validação do modelo APSIM-*Tropical Pasture* para capim Mombaça utilizando dados de Lavras-MG, entre 2015 e 2016, manejado por corte e sob condição irrigada (A) ou sequeiro (B), fertilizado com 550 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e sob condição irrigada (C) ou sequeiro (D), sem aplicação de N.



**Figura 9.** Séries temporais da massa de forragem viva estimada (—) e observada (●) para os experimentos utilizados na validação do modelo *APSIM-Tropical Pasture* para capim Mombaça utilizando dados de Sinop-MT, entre 2015 e 2016, manejado por corte e sob condição de sequeiro, fertilizado com 550 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (A) ou (B) sem aplicação de N.



**Figura 10.** Séries temporais da área foliar específica estimada (—) e observada (●) para os experimentos utilizados na validação do modelo *APSIM-Tropical Pasture* para capim Mombaça utilizando dados de Sinop-MT, entre 2015 e 2016, manejado por corte e sob condição de sequeiro, fertilizado com 550 kg de N ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (A) ou (B) sem aplicação de N.

### 3.4. Discussão

O modelo *APSIM-Tropical Pasture* mostrou-se eficiente em simular o crescimento do capim-mombaça manejado por corte, irrigado ou não-irrigado e com ou sem adubação nitrogenada. Destaca-se a capacidade do modelo em simular o efeito da ausência ou da presença de adubação nitrogenada, que nunca havia sido testada para esse modelo. Outro ponto importante desse estudo é a capacidade do modelo em simular o crescimento do capim-mombaça em diferentes locais (São Carlos, SP; Lavras, MG; e Sinop, MT), em áreas correspondentes a biomas como a Mata Atlântica, o Cerrado e a Amazônia, sob climas diferentes e em condições que representam as vigentes em algumas das mais importantes regiões produtoras de bovinos em pastagens tropicais.

A performance do modelo para a simulação do crescimento do capim-mombaça foi alcançada com os ajustes de vários parâmetros iniciais. Esses ajustes foram necessários principalmente devido às diferenças existentes entre o capim-piatã (*Urochloa brizantha*), cujos parâmetros foram usados como ponto de partida para esse estudo, e o capim-mombaça (*Megathyrsus maximus*). Dentre as diferenças entre essas espécies, pode-se destacar a produtividade e a responsividade ao N e à água (DOMICIANO et al., 2020).

No submodelo de folha foram ajustados os parâmetros que arbitram a assimilação de carbono pela planta. O capim-mombaça apresentou RUE (1,78 g MJ<sup>-1</sup>) 24% maior em comparação àquela observada para o capim-piatã

(1,44 g MJ<sup>-1</sup>). Contudo, em estudo que parametrizou o modelo APSIM-*Growth* para simular o crescimento de capim-mombaça, realizado por Araújo et al. (2013), o qual gerou parte do conjunto de dados empregado na atual parametrização (experimento 1), obtiveram RUE de 1,95 g MJ<sup>-1</sup> da PAR interceptada que foi menor em comparação a obtida no presente estudo (2,85 g MJ<sup>-1</sup> da PAR interceptada) (Figura 2). O maior valor estimado de RUE da PAR interceptada foi devido ao fato de que no presente trabalho considerou-se no cálculo o acúmulo de forragem e a interceptação de PAR de todo o dossel (utilizando a estimativa de interceptação de PAR abaixo da altura do resíduo, proposta por Bosi et al. (2020), de modo a evitar interferências na interceptação pelo material morto), enquanto que no trabalho de Araújo et al. (2013) foram utilizados os valores dessas variáveis apenas para o estrato acima da altura de resíduo (30 cm). O mesmo foi observado em outro estudo com a mesma espécie em sequeiro (ALEXANDRINO; GOMIDE; GOMIDE, 2005) em que o valor de RUE da PAR foi de 1,76 g MJ<sup>-1</sup> no verão e 0,54 g MJ<sup>-1</sup> no outono, considerando apenas o acúmulo e a interceptação de PAR acima de 20 cm do nível do solo, levando a subestimativa da massa de forragem acumulada pelo dossel e reduzindo a RUE. Em um estudo de meta-análise no qual investigou-se a variação da RUE e os fatores que influenciam essas variações em plantas forrageiras, baseado em dados de 48 estudos e 496 valores de RUE levantados, constatou-se que as variações na RUE são principalmente influenciadas por fatores ligados ao genótipo e à disponibilidade de recursos ambientais (água e N) (DRUILLE; OYAZABAL; OESTERHELD, 2019).

A interceptação de radiação é um dos fatores que influenciam a RUE, sendo calculada em função da IAF e do k (Lei de Beer-Lambert). O k foi um dos parâmetros ajustados nesse estudo, sendo reduzido de 0,65 (valor inicial) para 0,62 na presente parametrização, indicando que as folhas do capim-mombaça estão dispostas mais verticalmente no dossel comparadas às do capim-piatã, possibilitando melhor penetração da radiação no dossel e maior IAF. Volenec e Nelson (2020) relatam que plantas com uma orientação mais horizontal das folhas no dossel apresentam menor IAF, pois necessitam de menos área foliar para interceptar 95% da radiação solar incidente, e, conseqüentemente, tendem a ter menor taxa de crescimento.

Outros fatores que penalizam a RUE no APSIM-*Tropical Pasture* são o Ft, Fn e Fw, os quais também foram ajustados no presente estudo. O Ft é calculado com base nas temperaturas cardeais, sendo que a Tb foi aumentada de 8,9°C para 10,8°C, de modo a fornecer ao modelo a informação de que o capim-mombaça é mais sensível a baixas temperaturas comparado ao capim-piatã. Valor similar foi relatado na literatura (MORENO et al., 2014) com estimativas de Tb em 11°C para o capim-mombaça, usando o mesmo método empregado no presente trabalho. As temperaturas ótimas, TO1=30°C e TO2=35°C, foram definidas de acordo com estudo sobre o efeito das temperaturas diurnas e noturnas, que variaram de 10-40 °C, sobre o crescimento de forrageiras (IVORY; WHITEMAN, 1978). Esses autores observaram que as maiores taxas de crescimento ocorreram entre 29 e 35°C para cinco espécies de gramíneas, sendo 30°C a TO para *Megathyrus maximus* var. trichogme cv. Petrie. No entanto, esses valores divergem dos relatados por Araújo et al. (2013) (Tb = 15,6°C, TO1 = 21,0°C e TO2 = 21,9°C), para o capim-mombaça, e Lara et al. (2012) (Tb = 12°C, TO1 = 35°C e TO2 = 38°C) para o capim-tanzânia, este último usando algoritmos para otimização automática de parâmetros.

O Fn foi ajustado para considerar que a concentração ótima de N na folha é menor do que a concentração máxima, dinâmica que não existia no APSIM-*Tropical Pasture*, permitindo a simulação do consumo de luxo de N e das variações na concentração desse nutriente na faixa entre os valores de concentração ótima e máxima. Os valores de concentração mínima foram modificados de 0,0050 g g<sup>-1</sup> para 0,0087 g g<sup>-1</sup>, ótima de 0,0210 g g<sup>-1</sup> para 0,0181 g g<sup>-1</sup> e máxima de 0,0210 g g<sup>-1</sup> para 0,0367 g g<sup>-1</sup> de N foliar. Dessa forma, o capim-mombaça mostra-se menos tolerante a concentrações baixas de N, porém, atinge seu nível ótimo para o crescimento em concentrações mais baixas, em

comparação ao capim-piatã. Adicionalmente, também foram aumentados os valores de concentração de N máximo e mínimo para colmo, coroa e raízes. O Fw foi modificado para que o capim-mombaça sofra efeito do déficit hídrico quando a razão suprimento/demanda de água for igual ou menor a 0,75, fazendo com que ele mantenha seu potencial de crescimento em níveis acima desse valor, enquanto que, o capim-piatã começa a restringir o crescimento já em níveis mais altos de Fw (abaixo de 1,0), segundo o que foi parametrizado por Bosi et al. (2020), como uma estratégia para economizar água e se manter vivo e produtivo por mais tempo (SANTOS et al., 2013).

No submodelo de folha também foi modificada a AFE padrão e os efeitos da idade da planta e do déficit hídrico sobre a AFE. A AFE padrão, que é a AFE máxima atingida na fase vegetativa sob condições ótimas, foi aumentada de  $0,020 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  para  $0,021 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  e assumiu-se que esse valor apenas é atingido aos 0,7 anos de idade, momento em que o pasto foi considerado estabelecido no modelo (BOSI et al., 2020). Em estudos de parametrização de outros modelos, foram encontrados valores de AFE máxima, para a mesma cultivar, de  $0,0259 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  para o APSIM-Growth (ARAÚJO et al., 2013) e  $0,032 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$  para o CROPGRO-Perennial Forage (BRUNETTI, 2020) e para o cultivar Tanzânia foi definido o valor de 0,0356 no CROPGRO-Perennial Forage (LARA et al., 2012). Os maiores valores de AFE máximo relatados na literatura na parametrização ou na adaptação desses modelos citados anteriormente, pode se dever à inclusão dos dados de AFE mensurados do período de florescimento. Observou-se no conjunto de dados o efeito do florescimento sobre o aumento da AFE, sendo que os maiores valores de AFE foram obtidos nos ciclos em que a planta estava na fase reprodutiva. Quanto ao efeito do déficit hídrico sobre a AFE, o capim-mombaça foi considerando menos sensível ao déficit hídrico em comparação ao capim-piatã, e dessa forma a AFE foi menos penalizada. Isso está de acordo com as diferentes estratégias de cada capim frente ao déficit hídrico, sendo que o capim-piatã, provavelmente, reduz sua superfície de contato foliar e promove o enrolamento de folhas para reduzir a transpiração e economizar água.

Após a parametrização feita no presente estudo, o APSIM-*Tropical Pasture* foi capaz de simular o crescimento do capim-mombaça para diferentes cenários, em regiões com diferenças climáticas e níveis contrastantes de disponibilidade hídrica e de N. O modelo apresentou uma boa performance na simulação de massa de forragem viva ( $R^2 = 0,64$  a  $0,93$ ,  $d = 0,88$  a  $0,97$  e  $NSE = 0,61$  a  $0,91$ ,  $EM = -132,85$  a  $-7,43 \text{ g m}^{-2}$ ,  $EMA = 33,29$  a  $148,29 \text{ g m}^{-2}$  e  $RQME = 69,56$  a  $179,29 \text{ g m}^{-2}$ ), apresentando índices estatísticos semelhantes aqueles reportados na literatura para simulações com capim-mombaça ( $R^2 = 0,72$ ,  $d = 0,93$  e  $EM = 6 \text{ g m}^{-2}$ ) usando o modelo APSIM-Growth (ARAÚJO et al., 2013), capim-tanzânia ( $d = 0,98$  e  $RQME = 49,42 \text{ g m}^{-2}$ ) (LARA et al., 2012) e capim-mombaça ( $d = 0,96$  e  $RQME = 176,8 \text{ g m}^{-2}$ ) (BRUNETTI, 2020) usando o CROPGRO-Perennial Forage model.

Entretanto, apesar dos bons resultados constatados nesse estudo, alguns problemas foram observados durante as simulações. Nas simulações dos experimentos de calibração, as estimativas de massa de colmo e coroa apresentaram resultados insatisfatórios. Isso pode estar relacionado à incapacidade do modelo, na sua estrutura atual, de simular variações do coeficiente de extinção de luz ao longo dos ciclos, bem como as incertezas na partição de fotoassimilados entre a parte aérea e o sistema radicular. A performance do modelo em simular a AFE foi insatisfatória (Tabelas 15 e 16), o que pode estar relacionado à grande variabilidade dos dados, devido a posição das folhas amostradas e a participação da nervura central nas folhas de acordo com a maturidade foliar ou a erros no processamento das amostras (e.g. folhas dobradas). As simulações de massa de forragem viva sob irrigação do experimento 1 apresentaram alguns problemas na simulação dos maiores valores de alguns ciclos, com subestimativa em relação aos dados observados, o que pode estar relacionado a erros amostrais ou a condições específicas que ocorreram nesse experimento e que não possam ser captadas pelo modelo. Além desses problemas, as simulações para o experimento 4, em sequeiro e sem adubação nitrogenada, apresentaram superestimativas da massa de forragem em

vários ciclos de crescimento, o que pode estar relacionado a falhas do modelo em estimar perdas de nitrogênio por volatilização ou lixiviação para o local do experimento, ou até mesmo na dinâmica de decomposição da matéria orgânica.

Com base nas constatações do presente estudo, apesar dos bons resultados na simulação do crescimento de capim-mombaça, o modelo pode ser melhorado em vários aspectos para gerar melhores estimativas. A modelagem do N na planta e da sua dinâmica no sistema solo-planta pode ser melhor testada por meio da simulação de experimentos que possuam dados detalhados de concentração de N nas partes da planta e de matéria orgânica e N no solo. Dessa forma, melhorias podem ser propostas na simulação dos processos relacionados a esses estoques de N. Além disso, testar simulações com várias doses de N é importante para entender se o modelo está respondendo bem à variação do fornecimento desse nutriente. A simulação de partição de fotoassimilados na planta também pode ser melhorada. Para isso, estudos com a avaliação do sistema radicular e da parte aérea seriam importantes para determinar melhor os fluxos de fotoassimilados entre os órgãos da planta, além de estudos que avaliem possíveis variações na arquitetura da planta e, por consequência, do coeficiente de extinção de luz, em diferentes fases do crescimento e desenvolvimento. As estimativas de AFE também poderiam ser melhoradas por meio de estudos mais detalhados que avaliem a sua variabilidade em diferentes estratos da planta e os efeitos de possíveis erros de avaliação. Adicionalmente, sugere-se que o modelo seja testado para simular o capim-mombaça sob outros manejos como os de sistemas com pastejo.

### 3.5. Conclusão

O modelo APSIM-*Tropical Pasture* mostrou-se eficiente em simular o crescimento do capim-mombaça manejado por corte, irrigado ou não-irrigado, com ou sem adubação nitrogenada e em diferentes climas e biomas brasileiros. Apesar disso, algumas melhorias são necessárias para simulações mais eficientes, principalmente no que se refere à partição de fotoassimilados, ao efeito de diferentes doses de N no crescimento do capim e à simulação da área foliar específica.

A simulação do N na planta no APSIM-*Tropical Pasture* foi substancialmente melhorada com o ajuste para considerar a concentração ótima de N na folha menor do que a concentração máxima, dinâmica que não existia no modelo, permitindo a simulação do consumo de luxo de N e das variações na concentração desse nutriente na faixa entre os valores de concentração ótima e máxima, o que abre caminho para futuros estudos relacionados a esse tema.

### Referências

- ABIEC. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. **Beef Report Perfil da Pecuária no Brasil**. Brasília: DF. 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and drainage** Paper 56. FAO, Roma, 1998.
- ALEXANDRINO, E.; GOMIDE, J. A.; GOMIDE, C. A. M. Crescimento e desenvolvimento do dossel de *Panicum maximum* cv. Mombaça. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, p. 2164-2173, 2005.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.



- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; DE ARAUJO, L. C.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; MARIN, F.; LARA, M. A. S. Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. **Grass and Forage Science**, v. 71, n. 1, p. 54-65, 2016.
- ARAUJO, L. C. et al. Key factors that influence for seasonal production of Guinea grass. **Scientia Agricola**, v. 75, p. 191-196, 2018.
- ARAUJO, L.C.; SANTOS, P. M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P.; CRUZ, P. G. Simulating Guinea grass production: empirical and mechanistic approaches. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 61-69, 2013.
- ARNOLD, C.Y. The development and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**. v. 74, p. 430-445, 1959.
- BARIONI, L.G. MARTHA JÚNIOR, G.B.; RAMOS, A.K.B.; VELOSO, R.F.; RODRIGUES, D. de C.; VILELA, L. Planejamento e gestão do uso de recursos forrageiros na produção de bovinos em pastejo. In: **Anais do Simpósio sobre Manejo de Pastagens**, 20, 2003. Piracicaba: FEALQ, p. 105-153.
- BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PICKERING, N. B. 1998. The CROPGRO model for grain legumes. In: Tsuji, G.Y., (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1998. p. 99-128.
- BOSI, C. et al. APSIM-Tropical Pasture: A model for simulating perennial tropical grass growth and its parameterisation for palisade grass (*Brachiaria brizantha*). **Agricultural Systems**, v. 184, p. 102917, 2020.
- BROWN, H. E. et al. Plant modelling framework: software for building and running crop models on the APSIM platform. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 385-398, 2014.
- DOMICIANO, L. F. et al. Physiological responses and forage accumulation of Marandu palisadegrass and Mombaça guineagrass to nitrogen fertilizer in the Brazilian forage-based systems. **Grassland Science**, v. 67, n. 2, p. 93-101, 2020.
- DRUILLE, M.; OYARZABAL, M.; OESTERHELD, M. Radiation use efficiency of forage resources: a meta-analysis. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 1770-1778, 2019.
- FEITOSA, T. S. **Respostas agrônômicas de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu e *Panicum maximum* cv. Mombaça em função do suprimento de nitrogênio e água**. 2017. 58 p. Tese (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2017.
- GARCEZ, T. B.; MONTEIRO, F. A. Nitrogen use of *Panicum* and *Brachiaria* cultivars vary with nitrogen supply: II Nitrogen use efficiency rankings and partition. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 5, p. 622-631, 2016.
- GASTAL, F.; LEMAIRE, G. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: review of the underlying ecophysiological processes. **Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 1146-1171, 2015.
- GREENWOOD, D. J. et al. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. **Annals of Botany**, v. 66, n. 4, p. 425-436, 1990.
- HARE, M. D. et al. Effect of nitrogen on yield and quality of *Panicum maximum* cvv. Mombasa and Tanzania in Northeast Thailand. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 3, n. 1, p. 27-33, 2015.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 137-157, 2000.
- HOLZWORTH, D. et al. APSIM Next Generation: overcoming challenges in modernising a farming systems model. **Environmental Modelling & Software**, v. 103, p. 43-51, 2018.

- HOLZWORTH, D. P. et al. APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA [2017]. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2017/agropecuario.pdf>>. Acesso em: 01 de jan. 2020.
- IVORY, D. A.; WHITEMAN, P. C. Effect of temperature on growth of five subtropical grasses. I. Effect of day and night temperature on growth and morphological development. **Functional Plant Biology**, v. 5, n. 2, p. 131-148, 1978.
- JANK, L.; MARTUSCELLO, J. A.; EUCLIDES, V. P. B.; VALLE, C. B.; RESENDE, R. M. S. *Panicum maximum*. In: FONSECA, D. M.; MARTUSCELLO, J. A. (Eds.). **Plantas forrageiras**. Viçosa, MG:UFV, 2010, p. 166-196.
- JANK, L.; RESENDE, R. M. S.; VALLE, C. D.; RESENDE, M. D.; CHIARI, L.; CANÇADO, L. J.; SIMIONI, C. Melhoramento genético de *Panicum maximum*. In: RESENDE et al. (Eds.). **Melhoramento de forrageiras tropicais**. EMBRAPA, Campo Grande, MS, Brasil. 2008. p. 55–87.
- KINIRY, J. R. et al. Simulating Alamo switchgrass with the ALMANAC model. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 4, p. 602-606, 1996.
- LARA, M. A. S.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; PEDREIRA, B. C.; MORENO, L. S. B.; ALDERMAN, P. D. Predicting growth of *Panicum maximum*: an adaptation of the CROPGRO - perennial forage model. **Agronomy Journal**, v. 104, p. 600-611, 2012.
- LEMAIRE, G.; CIAMPITTI, I. Crop mass and N status as prerequisite covariables for unraveling nitrogen use efficiency across genotype-by-environment-by-management scenarios: a review. **Plants**, v. 9, n. 10, p. 1309, 2020.
- LISSEN, S.N.; INMAN-BAMBER, N.G.; ROBERTSON, M.J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. **Field Crop. Res.** v.92, p. 321–335, 2005.
- MANARIM, C. A.; MONTEIRO, F. A. Nitrogênio na produção e diagnose foliar do capim-mombaça. **Boletim de Indústria Animal**, v. 59, n. 2, p. 115-123, 2002.
- MARIN, F. R.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R. How can crop modelling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 49-63, 2014.
- MILLARD, P.; NIELSEN, G. H. The influence of nitrogen supply on the uptake and remobilization of stored N for the seasonal growth of apple trees. **Annals of Botany**, v. 63, p. 301-309, 1989.
- MORENO, L. S. B.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; ALVES, R. R. Base temperature determination of tropical *Panicum* spp. grasses and its effects on degree-day-based models. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.186, p.26-33, 2014.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASAE**, v.50, p.885-900, 2007.
- MUIR, J. P.; JANK, L. Guineagrass. In: MOSER, L.E.; BURSON, B.L.; SOLLENBERGER, L.E. (Ed.). **Warm-Season (C4) Grasses**. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2004. p. 589-621.
- PEDREIRA, B. C. et al. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, p. 370-379, 2011.

- PEDREIRA, B. C. **Capim Xaraés sob pastejo: respostas agrônômicas e morfofisiológicas, e adaptação do modelo CROPGRO para a predição de crescimento**. 2009. 122 p. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2009.
- PEQUENO, D. N.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J. Simulating forage production of Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) with the CROPGRO Perennial Forage model. **Crop and Pasture Science**, v. 65, n.12, p.1335-1348, 2014.
- PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; ALDERMAN, P. D.; FARIA, A. F. G. Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: implications for comparison of three *Tropical Pasture* grasses. **Grass and Forage Science**, v. 73, n. 2, p. 440-455, 2017.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.
- PROBERT, M.E.; DIMES, J.P.; KEATING, B.A.; DALAL, R.C.; STRONG, W.M., 1998. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**. v. 56, p. 1-18. 1998.
- RASSINI, J. B. **Irrigação de pastagens: frequência e quantidade de aplicação de água em Latossolos de textura média**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2002. 7 p. (Circular Técnica, 31).
- REYENGA, P. J. et al. Modelling global change impacts on wheat cropping in south-east Queensland, Australia. **Environmental Modelling & Software**, v. 14, n. 4, p. 297-306, 1999.
- RYMPH, S. J.; BOOTE, K. J.; IRMAK, A.; MISLEVY, P.; EVERS, G. W. Adapting the CROPGRO model to predict growth and composition of tropical grasses: developing physiological parameters. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, v. 63, p. 37–51, 2004.
- SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SANTOS, M. L. **Potencial de produção e modelagem da assimilação de carbono para *Panicum maximum* cv. Mombaça e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu**. 2016. 124 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop. 2016.
- SANTOS, P. M.; THORNTON, B.; CORSI, M. Nitrogen dynamics in the intact grasses *Poa trivialis* and *Panicum maximum* receiving contrasting supplies of nitrogen. **Journal of Experimental Botany**, v.53, n.378, p.2167-2176, 2002.
- SANTOS, P.M.; CRUZ, P.G.; ARAÚJO, L.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; VALLE, C.B.; PEZZOPANE, C.G. Response mechanisms of *Brachiaria brizantha* cultivars to water deficit stress. **Rev. Bras. Zootec.** v.42, p. 767-773, 2013.
- SIMON, B. K.; JACOBS, S. W. L. Megathyrsus, a new generic name for *Panicum* subgenus Megathyrsus. **Austrobaileya**, v. 6, n. 3, p. 571-574, 2003.
- SNOW, V. O.; HUTH, N. I. The APSIM–Micromet module. **HortResearch**, Auckland, 2004.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE [2018]. Disponível em:<[https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock\\_poultry.pdf](https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf)>. Acesso em: 10 de set. 2018.
- VOLENEC, J. J.; NELSON, C. Carbon metabolism in forage plants. **Forages: The Science of Grassland Agriculture**, v. 2, p. 65-84, 2020.
- ZHU, X. G.; LONG, S.P.; ORT, D.R. What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? **Current Opinion in Biotechnology**, v.19, p.153-159, 2008.

ZIADI, N. et al. Leaf nitrogen concentration as an indicator of corn nitrogen status. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 4, p. 947-957, 2009.