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

Calibração de modelos produtivos e da dinâmica de água no solo da plataforma
APSIM para capim-marandu, aveia preta e azevém

Débora Pantojo de Souza

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistema
Agrícolas

Piracicaba
2021

Débora Pantojo de Souza
Engenheira Agrônoma

Calibração de modelos produtivos e da dinâmica de água no solo da plataforma APSIM para
capim-marandu, aveia preta e azevém
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FERNANDO CAMPOS MENDONÇA**

Coorientador:
Dr. **JOSÉ RICARDO MACEDO PEZZOPANE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

Piracicaba
2021

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

Souza, Débora Pantojo de

Calibração de modelos produtivos e da dinâmica de água no solo da plataforma APSIM para capim-marandu, aveia preta e azevém / Débora Pantojo de Souza. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

113 p.

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

1. Modelo de cultura 2. Umidade de solo 3. Forrageira tropical 4. Forrageira de inverno I. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Vilma Pantojo de Souza e Donisete Luis de Souza pelo amor incondicional.

À memória dos meus avós Ermelinda Fregonesi Pantojo e Benedicto Pantojo e à minha tia-avó Julia Pantojo por deixarem esse mundo e nosso convívio no ano de 2020.

AGRADECIMENTOS

Á Deus por me dar a vida e permitir trilhar essa jornada.

Aos meus pais, Donisete e Vilma pela grande ajuda e incentivo. Á minha irmã e amiga Raquel pela ajuda, exemplo e incentivo durante minha vida. À meu noivo Nelson, por me apoiar, ajudar e estar presente durante esse tempo. Ás minhas tias: Cida, Meire, Renata, Rosa e Sil e ao meu tio Carlos e em nome das quais agradeço os demais familiares: primos, primas e agregados. À Joice, Sofia, Eloá e Bruno por me proporcionarem momentos artísticos únicos e me acolherem na família.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fernando Campos Mendonça por esses anos de convívio e aprendizado e ao cororientador Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane por agregar conhecimento e apoio ao trabalho. Ao amigo e parceiro desse trabalho, Dr. Cristiam Bosi pela ajuda fundamental nesse trabalho.

Á todos os amigos e colegas da pós-graduação que convivi desde o período do Mestrado até o Doutorado (2015 a 2020) que nos dão alegria e nos ajudam durante essa caminhada, nos momentos que compartilhamos durante as horas do café e nas disciplinas. Nesse último momento agradeço à Adriano, Ailson, Alex, Aline, Amauri, Angelo, Brenda, Carlos, Danielle, Diego, Elizabeth, Fernanda, Hugo, Jéssica, Juliana, Junior, Larissa, Lucas, Luciano, Nathália, Rubmara, Simone, Otávio, Thaís, Tércio, Timóteo e Tibério. E em especial à Danielle e Elizabeth, irmãs de orientação e integrantes da salinha.

Aos demais amigos que sempre estiveram presentes durante essa etapa e ao longo da vida: Aline (Guandu), Ana Paula, Arthur, Bassam, Edilma, Jaime (Magrão), Jean, Jéssica (Sama), Jéfferson (Tudão), Livia (Porva), Lucia Helena, Martha, Pedro (Rony) e Rebeca.

Aos funcionários do departamento de Engenharia de Biosistemas que estiveram envolvidos durante a experimentação e em outras questões administrativas: Sr. Antonio, Agnaldo, Alexandre, Áureo, Beatriz, Davilmar, Edivaldo, Fernanda, Francisco (Chiquinho), Francisco (Chicão), Gilmar, Ivone, José Geraldo, Juarez, Luis Custódio, Luiz Fernando, Paula Bonassa e Vanderlino. Também agradeço aos professores do departamento pelos conhecimentos transmitidos durante esse período.

Agradeço também a ajuda dos bolsistas PUB durante as coletas e avaliações experimentais: Artur, Beatriz, Gabriel, Paulo, Robson e Steffani. Agradeço ao Grupo de Pesquisa em Pastagens (GP²) em nome do prof. Dr. Carlos Guilherme Silveira Pedreira pela disponibilização do laboratório para o uso e avaliação.

À toda infraestrutura e todas as pessoas que fazem a ESALQ existir.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, através da bolsa de estudos durante o Doutorado, também com apoio da Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (Fealq) por meio de auxílios financeiros concedido à eventos científicos e a bolsa emergencial no final do Doutorado. Além disso, por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) no projeto 12/23002-6, o qual possibilitou a montagem da área experimental utilizada.

EPÍGRAFE

“A forma mais confiável de se prever o futuro é a de se conseguir fazer um bom exercício de compreensão do presente”

John Naissbitt

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUÇÃO GERAL	11
1.1. Objetivo geral.....	11
1.2. Objetivos específicos	12
Referências.....	12
2. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM- <i>TROPICAL PASTURE</i> PARA SIMULAR O CRESCIMENTO DO CAPIM-MARANDU MANEJADO POR CORTE.....	15
Resumo.....	15
Abstract	15
2.1. Introdução	16
2.2. Material e Métodos	18
2.2.1. Experimento 1	18
2.2.2. Experimento 2	21
2.2.3. Parametrização para capim-marandu	23
2.2.4. Avaliação do desempenho do modelo	24
2.3. Resultados	25
2.3.1. Parâmetros ajustados.....	25
2.3.2. Simulações para o Experimento 1	29
2.3.3. Simulações para o Experimento 2.....	34
2.4. Discussão	37
2.5. Conclusão.....	39
REFERÊNCIAS.....	39
3. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM- <i>OATS</i> PARA SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO DA AVEIA PRETA FORRAGEIRA SOBRE REGIMES DE CORTE.....	43
Resumo.....	43
Abstract	43
3.1. Introdução	44
3.2. Material e Métodos	45
3.2.1. Experimento 1	47
3.2.2. Experimento 2	49

3.2.3. Descrição do modelo APSIM- <i>Oats</i>	50
3.2.4. Parametrização do modelo.....	52
3.2.5. Índices de avaliação.....	52
3.3. Resultados.....	53
3.3.1. Parâmetros ajustados	53
3.3.2. Variáveis da Planta	56
3.3.3. Conteúdo de água no solo.....	59
3.4. Discussão	61
3.5. Conclusão	63
Referências	64
4. ESTRUTURAÇÃO DE UM MODELO PARA SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO DO AZEVÉM ANUAL NA PLATAFORMA APSIM (APSIM-ANNUAL RYEGRASS)	69
Resumo	69
Abstract.....	69
4.1. Introdução.....	70
4.2. Material e Métodos.....	71
4.2.1. Experimento 1	73
4.2.2. Experimento 2	74
4.2.3. Descrição do modelo APSIM- <i>Annual Ryegrass</i>	76
4.2.4. Parametrização do modelo.....	76
4.2.5. Avaliação do modelo	77
4.3. Resultados.....	78
4.3.1. Parametrização do submodelo de Fenologia	78
4.3.2. Parametrização dos submodelos dos órgãos da planta	79
4.3.3. Avaliação da simulação	83
4.4. Discussão	88
4.5. Conclusão	91
Referências	91
APÊNDICES.....	95
ANEXOS	103

RESUMO

Calibração de modelos produtivos e da dinâmica de água no solo da plataforma APSIM para capim-marandu, aveia preta e azevém

Atualmente os sistemas de produção animal baseados em pastagens irrigadas buscam a integração entre produção sustentável e retorno econômico utilizando a tecnologia para apoio na obtenção de resultados. A utilização de espécies de inverno pode ser uma das alternativas para aumento de oferta de forragem durante o período estacional, quando as forrageiras tropicais sofrem uma redução drástica de produtividade. O uso de modelos matemáticos permitem o melhor entendimento do comportamento de espécies em relação ao ambiente cultivado e possibilitam a simulação de seu potencial produtivo em diversas situações. Este estudo tem o objetivo de parametrizar modelos de simulação de crescimento de culturas forrageiras comumente utilizadas no Brasil, sendo o capim-marandu, aveia preta e o azevém anual. Os estudos foram separados por cultura e realizados em duas etapas: (a) experimento de campo para parametrização do modelo; (b) avaliação de desempenho do modelo. O experimento de campo foi conduzido em uma área na ESALQ/USP, em Piracicaba/SP, utilizando a forrageira tropical *Urochloa brizantha* cv. Marandu e as forrageiras de inverno aveia preta (*Avena strigosa*) cv. IAPAR 61 Ibiporã e azevém anual (*Lolium multiflorum*) cv. BRS Ponteio. Os experimentos foram conduzidos de 2017 a 2018, com o capim-marandu, além desse foi utilizado um experimento conduzido em São Carlos/SP entre 2009 a 2010. Os experimentos das culturas de inverno foram feitos entre os meses de abril e novembro no anos de 2018 e 2019. Conduzidos em sistema irrigado e sem irrigado e regime de cortes. Em todos os experimentos foram feitas medidas das plantas ao longo dos ciclos. Para esse estudo, foram utilizados modelos da plataforma APSIM®. Os modelos foram avaliados por meio de análise de erros, análise de índices de concordância e de confiança, e comparação com os coeficientes de determinação e de eficiência da modelagem. A parametrização do modelo APSIM-Tropical Pasture para o capim-marandu apresentou boa acurácia para as variáveis biomassa viva, massa de folha, índice de área foliar e altura. A simulação do conteúdo de água no solo mostrou resultados satisfatórios para a pastagem em sequeiro, com menor precisão para o tratamento irrigado. O modelo APSIM-Oats simulou com maior precisão dentre as variáveis da aveia preta, a biomassa total, biomassa viva, massa de folha e colmo. O conteúdo de água no solo apresentou resultados mais exatos para as camadas iniciais do perfil do solo (0 a 0,30 m). Através desse estudo, foi possível estruturar o modelo APSIM-Annual Ryegrass e calibrar alguns parâmetros dos submodelos dos órgãos, os resultados da avaliação das variáveis na planta, demonstraram maior precisão para a massa total, massa de material vivo, massa de folha e colmo e altura. Para os dados de umidade do solo, observou-se respostas semelhante ao estudo da aveia preta, resultados mais precisos nas camadas superficiais de 0 a 0,30 m. Esse trabalho acrescenta para a linha de pesquisa em modelagem de culturas, a calibração do APSIM-Tropical Pasture para o capim-marandu, do APSIM-Oats para a aveia preta e o modelo APSIM-Annual Ryegrass para a cultura do azevém anual, gerando resultados para novas abordagens.

Palavras-chave: Modelo de cultura, Umidade de solo, Forrageira tropical, Forrageira de inverno

ABSTRACT

Calibration of crop models and soil water dynamics of the APSIM platform for Marandu palisade grass, black oats, and ryegrass

Based on irrigated pastures, seek the integration between sustainable production and economic return using technology to support results achievement. The use of winter forage species can be an alternative for increasing the forage supply during the seasonal period when tropical forages decrease productivity. The use of mathematical models allows a better understanding of the behavior of species in the cultivated environment and enables the simulation of their productive potential in different situations. This study aims to parameterize growth stimulation models of forage crops commonly used in Brazil, with Marandu palisade grass, black oats, and Italian ryegrass. The studies were separated by crop, and carried out in two stages: (a) field experiment for parameterization of the model; (b) performance evaluation of the model. The field experiment was conducted in an area at ESALQ/USP, in Piracicaba/SP, using the tropical forage *Urochloa brizantha* cv. Marandu and black oat (*Avena strigosa*) cv. IAPAR 61 Ibiporã, and Italian ryegrass (*Lolium multiflorum*) cv. BRS Ponteio. The experiments were conducted from 2017 to 2018, with Marandu palisade grass, in addition to this, an experiment was carried out in São Carlos/SP between 2009 and 2010. The winter crop experiments were carried out between April and November in 2018 and 2019 in an irrigated and rainfed system and cut-and-carry management. In all experiments, measurements of the plants were made throughout the cycles. For this study, models from the APSIM® platform were used. The models were evaluated using error analysis, analysis of agreement and confidence indexes, and comparison with the coefficients of determination and model efficiency. The APSIM-*Tropical Pasture* model parameterization for Marandu palisade grass showed good accuracy for the variables live biomass, leaf mass, leaf area index, and canopy height. The soil water content simulation showed satisfactory results for rainfed pasture, with less precision for irrigated treatment, because the data of irrigated lead closer with less amplitude. The APSIM-*Oats* model simulated with greater precision among the variables of black oats, the total biomass, live biomass, leaf mass, and stem. Simulations of soil water content showed to be more accurate in the initial soil depth layers (0 to 0.30 m). This study allowed structuring the APSIM-Annual Ryegrass model and calibrating some parameters of the organs' sub-models. The evaluation of the variables in the plant demonstrated greater precision for the total mass, the live mass, leaf mass, and stem and height. For soil moisture data, the responses were similar to the study of black oats, more accurate results in the superficial layers (0 to 0.30 m). This work adds to the line of research in crop model, the calibration of APSIM-*Tropical Pasture* for marandu palisade grass, APSIM-*Oats* for black oats, and APSIM-*Annual Ryegrass* model for the Italian ryegrass generating results for new approaches.

Keywords: Crop model, Soil moisture, Tropical forage, Winter forage

1. INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, as pastagens ocupam aproximadamente 182 milhões de hectares, sendo aproximadamente 64% dessa área ocupada com pastagens cultivadas (IBGE, 2006), possui o segundo maior rebanho bovino do mundo, com mais de 214 milhões de animais (IBGE, 2018). Dentre as formas de manutenção ou aumento da oferta de forragem em pastagens tropicais durante o período estacional, pode-se citar a sobressemeadura, que tem como base a utilização de espécies adaptadas a condições climáticas de temperatura e radiação menores que o ideal para as gramíneas tropicais. Essa prática é bastante utilizada na região Sul e em partes das regiões Sudeste e Centro-Oeste do País.

Uma das formas de realizar estudos estratégicos sobre a expansão de culturas agrícolas em novos territórios é a modelagem de crescimento das culturas compreendidas a partir de elementos climáticos. As ferramentas que possibilitam a geração dessas simulações são modelos de culturas baseados em processos (MPC).

O uso da modelagem em forrageiras utilizadas como pastagem no Brasil ainda é recente e por conta disso, é importante e necessária a realização de estudos de parametrização e validação dos modelos para plantas forrageiras, a fim de alcançar melhor compreensão dos sistemas produtivos e melhorar a simulação de cenários futuros.

É primordial a parametrização das características das forrageiras, entre as quais, as temperaturas basal (T_b) e ótima (T_o), e a eficiência de uso da radiação solar (EUR), que compõem o ponto inicial para o entendimento das relações de crescimento das diferentes espécies (CHIMONYO; MODI; MABHAUDHI, 2016).

O processo de calibração é realizado quando há necessidade de ajustar parâmetros ainda incertos a um modelo existente, ou criação de um novo modelo para simulação de uma cultura. A parametrização de um modelo é realizada por meio de ajuste referente a uma determinada cultura, observando as variáveis climáticas, as características físicas e químicas do solo, e o manejo adotado (GAYDON et al., 2017).

Há alguns softwares que possibilitam a compreensão dos processos envolvidos no crescimento das culturas. Dentre eles, o Agricultural Production Systems Simulator (APSIM®) é uma plataforma integradora de modelos. O APSIM baseia-se em modelos de processos e integra outros modelos específicos para simulação da produção de espécies, as relações da planta com o Nitrogênio, o risco climático e as práticas de manejo de fazendas (HOLZWORTH et al., 2014; KEATING et al., 2003).

Estudos com espécies de forrageiras utilizadas no Brasil são recentes em modelagens mecanicistas (ANDRADE et al., 2016). Grande parte das abordagens refere-se a forrageiras de clima tropical, dentre as quais: *Paspalum notatum* Flüggé (RYMPH, 2004); *Urochloa brizantha* cv. Xaraés (PEDREIRA et al., 2011); *Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia (LARA et al., 2012); *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça (ARAUJO et al., 2013); *Urochloa* spp. cv. Mulato II (híbrido), *Cynodon* spp. Tifton-85 (híbrido) e *Urochloa brizantha* cv. Marandu (PEQUENO et al., 2014); e *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã em sistema de cultivo solteiro e silvipastoril (BOSI et al., 2020a, 2020b).

1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a parametrização e avaliação de modelos de simulação para o capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu), e para as forrageiras aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) cv. IAPAR 61, azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) cv. BRS Ponteio e, utilizando a plataforma APSIM.

1.2. Objetivos específicos

- I. Identificar os parâmetros de maior importância para cada espécie e cultura.
- II. Alterar os parâmetros de maior importância.
- III. Parametrizar o modelo para o capim-marandu através do APSIM-*Tropical Pasture* avaliando através de respostas produtivas e biométrica da cultura e de dados de umidade do solo.
- IV. Parametrizar o modelo para aveia preta IAPAR 61 Ibiporã utilizando o APSIM-*Oats* avaliando através de respostas produtivas e biométrica da cultura e de dados de umidade do solo.
- V. Estruturar o modelo para o azevém anual (APSIM-*Annual Ryegrass*), calibrar e avaliar alguns parâmetros para o mesmo.

Referências

- ARAUJO, L. C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, D.; PEZZOPANE, J. R. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; CRUZ, P. G. Simulating Guinea Grass Production: Empirical and Mechanistic Approaches. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 61–69, 2013.
- BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N. I.; PEZZOPANE, J. R. M.; ANDREUCCI, M. P.; SANTOS, P. M. APSIM-*Tropical Pasture*: A model for simulating perennial tropical grass growth and its parameterisation for palisade grass (*Brachiaria brizantha*). **Agricultural Systems**, v. 184, n. March, p. 1–13, 2020a.
- BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 177, n. May 2019, p. 102724, jan. 2020b.
- CHIMONYO, V. G. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. Simulating yield and water use of a sorghum – cowpea intercrop using APSIM. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 317–328, 2016.
- GAYDON, D. S.; WANG, E.; POULTON, P. L.; AHMAD, B.; AHMED, F.; AKHTER, S.; ALI, I.; AMARASINGHA, R.; CHAKI, A. K.; CHEN, C.; CHOUDHURY, B. U.; DARAI, R.; DAS, A.; HOCHMAN, Z.; HORAN, H.; HOSANG, E. Y.; KUMAR, P. V.; KHAN, A. S. M. M. R.; LAING, A. M.; LIU, L.; MALAVIACHICHI, M. A. P. W. K.; MOHAPATRA, K. P.; MUTTALEB, M. A.; POWER, B.; RADANIELSON, A. M.; RAI, G. S.; RASHID, M. H.; RATHANAYAKE, W. M. U. K.; SARKER, M. M. R. SENA, D. R.; SHAMIM, M.; SUBASH, N.; SURIADI, A.; SURIYAGODA, L. D. B.; WANG, G.; WANG, J.; YADAV, R. K.; ROTH, C. H. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017.
- HOLZWORTH, D. P.; APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2006**. [s.l: s.n.].
- IBGE. **Pesquisa Pecuária Municipal**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2017>>. Acesso em: 4 out. 2018.
- KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, M. J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; HARGREAVES, J. N. G. An over view of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 267–288, 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, n. 3, p. 600–611, 2012.
- PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, Carlos G. S.; BOOTE, K. J.; LARA, M. A. S.; ALDERMAN, P. D. Field Crops Research 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, n. 12, p. 1335–1348, 2014. <https://doi.org/10.1071/CP14058>
- RYMPH, S. J. **Modeling growth and composition of perennial tropical forage grasses**. [s.l.] University of Florida, 2004.

2. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM-Tropical Pasture PARA SIMULAR O CRESCIMENTO DO CAPIM-MARANDU MANEJADO POR CORTE

Resumo

O uso de modelos de processos como o *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) pode ser útil para ajudar a entender o crescimento e o desenvolvimento das pastagens. O objetivo desse estudo foi parametrizar o modelo APSIM-Tropical Pasture para simular o crescimento do capim-marandu, irrigado e não-irrigado, sob manejo por corte. A parametrização foi realizada com dados experimentais coletados em Piracicaba, SP, Brasil (Experimento 1) e em São Carlos, SP, Brasil (Experimento 2). O Experimento 1 foi realizado em 11 ciclos de crescimento do capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) durante um ano, compreendido entre dezembro de 2017 e dezembro de 2018, com sistema irrigado e sem irrigação; o capim foi cortado na altura de 0,15m no final de cada ciclo (altura de resíduo). O Experimento 2 foi realizado em 9 ciclos de crescimento, de abril de 2009 a fevereiro de 2010. Em ambos os experimentos foram avaliados a massa viva total sobre o solo, composta de massa de folhas (MF) e colmos, e a área foliar específica (SLA), o índice de área foliar (LAI), a massa de material morto e a altura do dossel. O colmo foi dividido em duas partes: massa de coroa, a qual representa a massa do colmo abaixo de 0.10 m, e a outra parte a massa de colmo acima de 0,10 m do resíduo. No Experimento 1, foi avaliado o conteúdo de água no solo, com medições realizadas por um sensor capacitivo, nas profundidades de 0 a 0,9m. Como ponto de partida para a calibração, foi utilizada uma parametrização feita para o capim-piatã. A calibração foi realizada para as variáveis temperatura basal (T_b), coeficiente de extinção de luz (k), eficiência de uso da radiação (RUE) e SLA padrão. A performance do modelo foi avaliada por meio dos seguintes índices estatísticos: raiz quadrada do erro médio (RMSE), erro médio, erro médio absoluto, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), coeficiente 'd' de Willmott e coeficiente 'c'. Os valores dos parâmetros calibrados foram: RUE = 2.27 g MJ⁻¹, k = 0.659, T_b = 10.3 °C, e SLA padrão = 0.027 m² g⁻¹. Foi ajustado o fator de déficit hídrico para mudança de SLA. O modelo de calibrado mostrou-se mais preciso em simular biomassa viva, massa de folha, LAI e altura dentre todas as variáveis testadas. No sistema irrigado, os valores das estatísticas ficaram entre 0,64 e 0,86 para R^2 ; entre 0,59 e 0,70 para NSE e entre 0,88 e 0,95 para o coeficiente 'd'. No sistema em sequeiro, para essas mesmas variáveis, os valores de R^2 variaram entre 0,70 a 0,86; NSE de 0,54 a 0,70 e coeficiente 'd' de 0,91 a 0,94. A simulação do conteúdo de água no solo mostrou resultados satisfatórios para a pastagem em sequeiro, com menor precisão para o tratamento irrigado. A calibração do modelo APSIM-Tropical Pasture para capim-marandu resultou em simulações satisfatórias do crescimento da pastagem sob manejo por corte, em sistemas irrigados e de sequeiro.

Keywords: *Urochloa brizantha*, Modelo de cultura, Umidade do solo, Irrigação, Sequeiro, Forragem

Abstract

The use of process models such as the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) can be useful to help understand pasture growth and development. This study aimed to parameterize the APSIM-Tropical Pasture model to simulate the growth of marandu grass, irrigated, and rainfed, under cut-and-carry management. Parameterization was performed with experimental data collected in Piracicaba, SP, Brazil (Experiment 1), and São Carlos, SP, Brazil (Experiment 2). Experiment 1 was carried out in 11 growth cycles of marandu palisade grass (*Urochloa brizantha* cv. Marandu) for one year, between December 2017 and December 2018, with an irrigated system and without irrigation; the grass was cut at a height of 0.15 m at the end of each cycle (height of stubble). Experiment 2 was carried out in 9 growth cycles, from April 2009 to February 2010. In both experiments, the total live mass above the ground, composed of leaf mass (MF) and stems, and the specific leaf area (SLA), the leaf area index (LAI), the mass of dead material, and the height. The stem was divided into two parts: crown mass, which represents the stem mass below 0.10 m, and the other part, the stem mass above 0.10 m from the stubble. In Experiment 1, the water content in the soil was evaluated, with measurements made by a capacitive sensor, at depths from 0 to 0.9m. As a starting point for calibration, a parameterization made for piatã grass was used. Calibration was performed for the variables baseline temperature (T_b), light extinction coefficient (k), radiation use efficiency (RUE), and standard SLA. The performance of the model was evaluated using the following statistical indices: square root of the average error (RMSE), average error, absolute mean error, coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), coefficient 'd' from Willmott, and coefficient 'c'. The values of the calibrated for Irrigated experiment parameters were: RUE = 2.27 g MJ⁻¹, k = 0.659, T_b = 10.3 °C, and standard SLA = 0.027 m² g⁻¹. The water deficit factor for SLA change was adjusted. The calibrated model proved to be more accurate in simulating living biomass, leaf mass, LAI, and height among all tested variables. In the irrigated system, the values of the

statistics were between 0.64 and 0.86 for R^2 ; between 0.59 and 0.70 for NSE, and between 0.88 and 0.95 for the 'd' coefficient. In the rainfed system, for these same variables, R^2 values ranged from 0.70 to 0.86; NSE from 0.54 to 0.70, and the 'd' coefficient from 0.91 to 0.94. The simulation of water content in the soil showed satisfactory results for rainfed pasture, with less precision for irrigated treatment. The calibration of the APSIM-*Tropical Pasture* model for marandu grass resulted in satisfactory simulations of pasture growth under cut-and-carry management, in irrigated and rainfed systems.

Palavras-chaves: *Urochloa brizantha*, Crop model, Soil moisture, Irrigation, Rainfed, Forage

2.1. Introdução

Sistemas de criação de animais à pasto têm predominância na área agrícola do Brasil, com 159,5 milhões de hectares ocupados por pastagens, dos quais 100,1 milhões de hectares são de pastagens cultivadas em boas condições (IBGE, 2017). Dentre as espécies cultivadas para a alimentação de bovinos de corte e de leite a pasto no Brasil, a *Urochloa brizantha* é uma das mais importantes. A *Urochloa brizantha* cv. Marandu, denominada capim-marandu ou Braquiário, é a cultivar mais utilizada devido ao seu potencial para produção de forragem, superior ao da *U. decumbens* (espécie predominante anteriormente) e com grande representatividade na área total plantada do país (ALVIM; BOTREL; XAVIER, 2002; VALLE et al., 2004; PEDREIRA; TONATO; LARA, 2009).

A pastagem se caracteriza como qualquer outra cultura, se diferenciando quanto à colheita, que, em sistemas com pastejo, é feita pelo próprio animal. Como um sistema produtivo, a produção das plantas forrageiras pode ser estudada a partir da ciência que compreende os sistemas agrícolas. Uma das formas de compreender e descrever processos fisiológicos, físicos e bioquímicos que ocorrem na natureza é a simulação por meio da modelagem (JONES et al., 2016).

As ferramentas que possibilitam a geração dessas simulações são os modelos de culturas baseados em processos (MPC) (HE et al., 2017; HOLZWORTH et al., 2018). Estudos com modelagem do crescimento possibilitam o gerenciamento produtivo de uma fazenda (JONES et al., 2016; SILVA et al., 2017), a realização de estudos estratégicos sobre a expansão de culturas agrícolas em novos territórios e estudos com cenários de mudanças climáticas (KALAUGHER et al., 2017; PEZZOPANE et al., 2018; ZHANG et al., 2019), além de diversas outras abordagens (HOLZWORTH et al., 2018).

Há algumas plataformas de modelagem que possibilitam a compreensão dos processos envolvidos no crescimento das culturas. Dentre elas, as mais difundidas são a Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT®) e a Agricultural Production Systems Simulator (APSIM®), que são integradoras de MPC's, utilizados também para simulação de plantas forrageiras.

O APSIM baseia-se em modelos de processos e integra módulos específicos (água no solo, balanço de nitrogênio, arbitradores de matéria seca) para simulação dos órgãos das plantas, das relações da planta com o nitrogênio, do risco climático e das práticas de manejo em fazendas. Com o software APSIM, é possível modelar sistemas complexos e simular o crescimento de plantas sob diferentes manejos (KEATING et al., 2003; HOLZWORTH et al., 2014, 2018).

Para utilizar modelos de cultura, é necessário unir as teorias básicas de crescimento da cultura com os dados experimentais (JONES et al., 2016), partindo da parametrização de uma estrutura de processo, para finalizar em um modelo de cultura específica. Após uma etapa inicial da criação, o mesmo pode ser calibrado para diferentes cultivares e culturas com características semelhantes e aplicado a locais diferentes. Em todas as aplicações é necessário avaliar a precisão e a exatidão das estimativas, de modo a verificar sua capacidade de simulação (HE et al., 2017).

O processo de parametrização é realizado quando há necessidade de ajustar parâmetros ainda incertos a um modelo existente ou de criar um modelo para simulação de uma cultura agrícola. A parametrização de um modelo é realizada por meio de ajustes referentes a uma determinada cultura, observando as variáveis climáticas, as características físicas e químicas do solo, e o manejo adotado (GAYDON et al., 2017).

Durante o processo de parametrização de um modelo, é primordial a calibração das características da planta forrageira em questão, dentre as quais, as temperaturas basais inferior e superior e as temperaturas ótimas, e a eficiência de uso da radiação solar (RUE), que compõem o ponto inicial para o entendimento das relações de crescimento das diferentes espécies (CHIMONYO; MODI; MABHAUDHI, 2016; GAYDON et al., 2017).

Dentro do estudo da modelagem de forrageiras, a primeira abordagem da plataforma DSSAT foi a de Rymph (2004), que ajustou o modelo CROPGRO-Perennial Forage para a espécie *Paspalum notatum* Flüggé. Este estudo possibilitou novas abordagens, dentre as quais a adaptação desse modelo para *Urochloa brizantha* cv. Xaraés (PEDREIRA et al., 2011) e *Megathyrsus maximus* (syn. *Panicum maximum*) cv. Tanzânia (LARA et al., 2012). Posteriormente, foram realizadas parametrizações do modelo CROPGRO-Perennial Forage para as forrageiras *Urochloa* spp. cv. Mulato II (híbrido), *Cynodon* spp. Tifton-85 (híbrido) e *Urochloa brizantha* cv. Marandu (PEQUENO et al., 2014; PEQUENO et al., 2018) e uma última abordagem também para o capim-marandu (SANTOS et al., 2019). Mais recentemente, o mesmo modelo foi parametrizado para a estimativa do crescimento de *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã (BOSI et al., 2020b).

O software APSIM foi anteriormente utilizado para simular plantas forrageiras tropicais, inicialmente, por meio do módulo Growth, disponível no APSIM Classic. Esse módulo foi parametrizado para *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça (ARAUJO et al., 2013). Mais recentemente, com a criação de uma nova versão do software, a APSIM Next Generation (HOLZWORTH et al., 2018), surgiu a necessidade de se gerar um novo modelo para pastagens tropicais, com maior capacidade de simular os processos dessas culturas. Dessa forma, BOSI et al. (2020b) desenvolveram o modelo APSIM-*Tropical Pasture*. Esse modelo foi desenvolvido com base na Plant Modelling Framework (BROWN et al., 2014) e é composto por uma equação principal, que calcula o crescimento da pastagem, e por submodelos que simulam processos relacionados à fenologia, à alocação de biomassa e nitrogênio e aos órgãos da planta (folha, colmo, órgão de reserva e raiz) (Bosi et al., 2020b). O APSIM-*Tropical Pasture* foi inicialmente parametrizado para *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã (Bosi et al., 2020b) e, posteriormente, Gomes et al. (2020) modificaram essa parametrização, inserindo alguns valores de parâmetros obtidos por Pezzopane et al. (2018) e ajustando-a para simular o capim-marandu sob lotação contínua e em condições de sequeiro.

Estudos em modelagem de forrageiras tropicais cultivadas no Brasil ainda são recentes e necessitam de mais esforços para melhorar os resultados de simulação, evidenciando a importância de estudos de parametrização de modelos para essas plantas. Especificamente para o capim-marandu, existe um estudo de simulação dessa cultivar com o modelo APSIM-*Tropical Pasture* (GOMES et al., 2020), porém, esse estudo foi realizado com uma calibração voltada para uma condição muito específica (lotação contínua e condição de sequeiro).

Assim sendo, há a necessidade de se buscar parametrizações que possam ser aplicadas a condições mais gerais de sistemas de pastagens manejadas por corte, em sistema irrigados e de sequeiro. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho foi parametrizar o modelo APSIM-*Tropical Pasture* para simular o crescimento do capim-marandu, irrigado e não-irrigado, sob manejo por corte.

2.2. Material e Métodos

O presente estudo foi realizado com a utilização dos dados de dois experimentos, um realizado no município de Piracicaba, entre dezembro de 2017 e dezembro de 2018, e outro realizado no município de São Carlos, no período de abril de 2009 a fevereiro de 2010, realizado por Cruz (2010), ambos utilizando o capim-marandu (*Urochloa brizantha* (Hochst ex A. Rich.) R.D. Webster cv. Marandu), com ciclos de crescimento e corte ao longo do ano.

2.2.1. Experimento 1

O experimento de campo foi realizado em área experimental de capim-marandu na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), em Piracicaba, SP (22°42'15.9"S 47°37'22.6"W, 546 m). O solo da área é classificado como Nitossolo vermelho eutroférico latossólico (SANTOS et al., 2013). A semeadura do capim foi realizada em linhas, em fevereiro de 2016. A área foi conduzida nos anos de 2016 e 2017 com manejo de cortes a cada 28 dias, com altura de resíduo de 0,15 m e aplicação de diferentes doses de nitrogênio (GARCÍA, 2019). O experimento teve início no dia 18 de dezembro de 2017 com um corte de rebaixamento da parcela a 0,20 m.

As análises físicas necessárias à caracterização do solo foram anteriormente realizadas por Prudente Junior (2019) no Laboratório de Física e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP), dentre elas a análise granulométrica (textura), a curva característica de retenção de água: capacidade de campo (DUL), ponto de murcha permanente (LL15) e ponto de saturação (SAT), e a densidade volumétrica (BD). A Tabela 1 demonstra os valores discriminados por profundidade do solo. O coeficiente de extração da água no solo (TPKL) foi adotado conforme o modelo padrão e não considerou nenhum impedimento ao crescimento das raízes assumindo e o fator de exploração radicular (TPXF) 1 em todas as camadas do perfil.

Tabela 1. Características físicas do solo da área do Experimento 1, conduzido em Piracicaba/SP. Composição granulométrica (argila, areia e silte), 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), avaliados por Prudente Junior (2019). Ponto de murcha para a forrageira tropical (TPLL), coeficiente de extração de água para a forrageira tropical (TPKL), e fator de exploração radicular para a forrageira tropical (TPXF) ajustados por BOSI et al. (2020b).

Profundidade unidade m	Argila	Areia	Silte	BD	AirDry	LL15	DUL	SAT	TPLL	TPKL	TPXF
		%		g cm ⁻³			mm mm ⁻¹			d ⁻¹	(0-1)
0 - 0,10	46,22	32,25	21,53	1,35	0,23	0,24	0,39	0,49	0,24	0,05	1
0,10 - 0,20	46,22	32,25	21,53	1,46	0,24	0,25	0,37	0,45	0,25	0,05	1
0,20 - 0,30	57,40	24,94	17,66	1,48	0,28	0,29	0,34	0,44	0,29	0,02	1
0,30 - 0,40	57,40	24,94	17,66	1,46	0,29	0,30	0,35	0,45	0,30	0,05	1
0,40 - 0,50	57,40	24,94	17,66	1,43	0,32	0,33	0,36	0,46	0,33	0,04	1
0,50 - 0,60	57,40	24,94	17,66	1,38	0,32	0,32	0,38	0,48	0,32	0,03	1
0,60 - 0,70	56,70	24,49	18,81	1,30	0,31	0,31	0,36	0,48	0,31	0,04	1
0,70 - 0,80	56,70	24,49	18,81	1,31	0,31	0,31	0,33	0,43	0,31	0,03	1
0,80 - 0,90	56,70	24,49	18,81	1,39	0,29	0,29	0,32	0,42	0,29	0,03	1
0,90 - 1,50	54,02	26,17	20,34	1,39	0,29	0,29	0,32	0,42	0,30	0,04	1

Antes do início da coleta de dados do experimento, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 a 0,40 m, para análise química e correção da fertilidade do solo. Foram realizadas a correção do solo e a adubação inicial na área, calculadas conforme os diferentes níveis de fertilidade do solo, devido aos diferentes tratamentos de adubação aplicados em experimento anterior. Foram aplicados 2 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico, 105 kg ha⁻¹ de Cloreto de Potássio e 3,8 kg ha⁻¹ de Boro.

Após o período necessário à reação do calcário, antes do início do experimento 14/12/2017, foi realizada nova caracterização química completa (matéria orgânica, carbono orgânico, pH, saturação por bases, soma de bases, macronutrientes, nitrato – N-NO₃⁻ e amônio – N-NH₄⁺), nas profundidades de 0 a 0,8 m, coletadas a cada 0,2 m, medidas necessárias para entrada no modelo. Também foram realizadas análises de condutividade elétrica e pH (em água) do solo, no Laboratório de Física e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP). Os valores por profundidade estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização inicial do solo por profundidade, quantidade de nitrato (NO₃) e amônio (NH₄), pH (em água), condutividade elétrica (CE) e porcentagem de carbono orgânico (CO), Piracicaba/SP.

Profundidade unidade m	NO ₃ ppm	NH ₄ ppm	pH	CE dS/m	CO %
0 - 0,20	35,00	42,00	7,26	0,66	1,18
0,20 - 0,40	14,00	39,00	4,20	0,26	0,75
0,40 - 0,60	60,00	46,00	4,98	0,25	0,75
0,60 - 0,80	25,00	28,00	4,96	0,21	0,36
0,80 - 1,00	25,00	28,00	4,96	0,21	0,36
1,00 - 1,50	10,37	22,61	4,96	0,21	0,36

Os ciclos de crescimento foram contabilizados em dias fixos, com duração de 28 dias durante primavera e verão, e de 42 dias durante outono e inverno, totalizando 11 ciclos (Tabela 3). A adubação nitrogenada de manutenção foi realizada após cada corte do capim-marandu, para manutenção de condição ótima e sem restrição para produtividade potencial foram utilizadas, na forma de ureia, a dose de 80 kg ha⁻¹ de N durante os ciclos de primavera e verão, e com 50 kg ha⁻¹ de N durante os ciclos de outono e inverno, totalizando 790 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N.

O experimento foi conduzido em duas situações de manejo hídrico: Irrigação por aspersão convencional (I) e sequeiro (R). O manejo da irrigação foi feito por meio do monitoramento da umidade do solo, com o auxílio de uma sonda capacitiva FDR (Frequency Domain Reflectometry), com 4 pontos de medição em cada tratamento I e R, e com tensiômetros, com 4 repetições e em 3 profundidades (0,15; 0,30 e 0,60 m), na área irrigada. A irrigação foi feita sempre que a umidade chegou ao nível crítico, definido por um fator de depleção igual a 30% da capacidade de água disponível ($f = 0,3 \text{ CAD}$), mantendo o solo em uma faixa de umidade ideal ao crescimento das forrageiras. As lâminas d'água de irrigação foram calculadas de modo que a umidade retornasse à capacidade de campo.

Um esquema da área experimental é apresentado na Figura 1. Cada sistema de manejo hídrico (irrigado e sequeiro) foi conduzido em quatro parcelas de 18 m² (4,5 x 4 m). As parcelas úteis da área em sequeiro foi espaçada em sete metros das parcelas úteis da área irrigada (Figura 1).

Figura 1. Fotos (esquerda) e croqui (direita) do Experimento 1, conduzido em Piracicaba/SP.

Durante o experimento, a radiação solar média foi de $17,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, as temperaturas mínima e máxima média do ar foram de $16,1^\circ \text{C}$ e $29,0^\circ \text{C}$ respectivamente, com acumulado de precipitação pluvial de 1260,96 mm. Na Tabela 3, estão apresentadas as informações meteorológicas de cada ciclo do Experimento 1.

Tabela 3. Datas dos ciclos de coleta e médias da radiação solar diária (R_s), temperaturas máximas (T_{max}) e mínimas (T_{min}) e velocidade do vento (u) e acumulado de precipitação pluvial (R) e Irrigação (I) durante os ciclos produtivos do Experimento 1, conduzido de 19/12/2017 a 06/12/2018, em Piracicaba/SP.

Ciclo	Data (início - fim)	R_s $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	T_{max} $^\circ \text{C}$	T_{min} $^\circ \text{C}$	u m s^{-1}	R mm	I mm
1	19/12/2017 a 16/01/2018	18,17	29,40	19,50	1,47	258,78	29,10
2	16/01 a 13/02/2018	22,47	31,37	19,36	1,67	99,51	65,20
3	13/02 a 13/03/2018	19,60	30,38	19,33	1,56	144,27	22,60
4	13/03 a 10/04/2018	19,25	31,26	19,34	1,32	166,36	8,00
5	10/04 a 08/05/2018	17,37	29,74	15,90	1,53	1,27	54,80
6	09/05 a 20/06/2018	12,88	26,63	12,76	1,39	21,84	57,00
7	21/06 a 02/08/2018	13,74	28,66	11,35	1,49	6,35	127,0
8	02/08 a 13/09/2018	16,17	26,70	12,06	1,69	102,06	72,50
9	14/09 a 11/10/2018	16,27	28,90	17,39	1,51	140,71	35,10
10	12/10 a 08/11/2018	19,94	29,18	17,45	1,84	89,92	6,50
11	08/11 a 06/12/2018	19,87	29,66	18,45	1,86	229,88	7,60

O crescimento do capim, nos diferentes sistemas de regime hídrico, foi acompanhado semanalmente, por meio de medições de altura do dossel, de produtividade de forragem e da área foliar específica (SLA). O intervalo entre coletas foi ajustado conforme a duração do ciclo, sendo 4 coletas por ciclo de cultivo.

A altura do dossel forrageiro foi medida com o auxílio de uma fita métrica, medindo-se a altura da folha mais recentemente expandida. A altura do resíduo pós-corte da pastagem foi de 0,15 m. Todo o material acima da altura do resíduo foi coletado, no interior de quatro quadros de amostragem (área individual de $0,25 \text{ m}^2$). Após a coleta, as amostras foram separadas e pesadas para determinação da percentagem de matéria seca das frações folha,

colmo e material morto. As amostras foram secas em estufa com circulação forçada a 65°C até atingir peso constante. Ao final de cada ciclo de crescimento, a área total das parcelas foi rebaixada com roçadeira costal até a altura de resíduo predefinida.

A SLA foi determinada nas quatro coletas de cada ciclo, utilizando 0,1 kg de folhas de cada amostra coletada, passando essas folhas em um integrador de área foliar (LI-3100C, Li-Cor®) e posteriormente relacionando a área foliar com a massa das folhas para a determinação indireta do índice de área foliar (IAF).

Foram coletadas amostras do resíduo (massa abaixo da altura de corte) uma vez por estação do ano, cortadas ao nível do solo, em quatro repetições, utilizando o quadro de amostragem. As amostras também foram separadas, pesadas e secas para determinação da percentagem de matéria seca das frações folha, colmo e material morto. O colmo do resíduo foi dividido em duas partes: massa de coroa, a qual representa a massa do colmo abaixo de 0,10 m, e a outra parte a massa de colmo acima de 0,10 m do resíduo.

Os dados de umidade do solo obtidos com a sonda FDR Diviner®, foram também utilizados como dados observados para ajuste da simulação na plataforma APSIM. A frequência relativa foi convertida para umidade volumétrica segundo a calibração feita para o solo em estudo prévio (PRUDENTE JUNIOR et al., 2019). A partir da curva característica de retenção de água no solo, realizada em laboratório, foi realizado um ajuste nas umidades volumétricas (θ) representativas dos pontos LL15, DUL e SAT na maioria das profundidades. Os dados observados em campo pela sonda FDR, principalmente em relação aos dados de LL15 e DUL, foram menores do que os dados estimados em condições de laboratório. Dessa forma, foi necessário ajustar esses parâmetros a fim de minimizar o erro nas simulações, utilizando como balizador a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o ajuste para a capacidade de campo foi realizado considerando somente os períodos sem volumes excessivos de chuva que pudessem causar a saturação do solo e para o ponto de murcha permanente aqueles ao final dos maiores intervalos sem chuva, conforme a metodologia utilizada por outros autores (BOSI; PEZZOPANE; SENTELHAS, 2020). Os valores do parâmetro solo seco ao ar foram ajustados após a determinação da LL15, subtraindo-se 0,01 mm do valor dessa variável, nas camadas de 0,00 a 0,50 m de profundidade, e mantendo os valores iguais à LL15 para as profundidades maiores.

2.2.2. Experimento 2

O segundo experimento utilizado nesse estudo foi realizado em área experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, no município de São Carlos, SP, (21° 57 'S, 47° 50' W, 860 m), localizada a aproximadamente 100 km da localidade em que foi realizado o Experimento 1. Nesse experimento utilizou-se uma área de capim-marandu em implantação, semeado em linhas.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho-Amarelo (SANTOS et al., 2013). Foram realizadas análises para o levantamento das características físicas por Bosi et al. (2020b) (Tabela 4) e para a caracterização química (Tabela 5), antes do início do experimento. Assim como no Experimento 1, os parâmetros LL15, DUL e SAT foram ajustados para as condições locais do perfil do solo, próximo aos tubos de acesso para a sonda Diviner®, enquanto, o parâmetro solo seco ao ar foi ajustado subtraindo-se 0,01 mm do valor dessa variável nas camadas de 0,00 a 0,20 m de profundidade. O TPKL e o TPXF também foram adotados conforme o modelo padrão e o Experimento 1.

Tabela 4. Características físicas do solo da área do Experimento 2, conduzido em São Carlos/SP. Composição granulométrica (argila, areia e silte), densidade do solo (BD), umidade do solo seco ao ar (Air Dry), ponto de murcha permanente em 15 bar (LL15), capacidade de campo (DUL), ponto de saturação (SAT), ponto de murcha para a forrageira tropical (TPLL), coeficiente de extração de água para a forrageira tropical (TPKL), e fator de exploração radicular para a forrageira tropical (TPXF), determinados por BOSI et al. (2020b).

Profundidade unidade m	Argila	Areia %	Silte	BD g cm ⁻³	Air Dry	LL15	DUL	SAT	TPLL	TPKL d ⁻¹	TPXF (0-1)
0 - 0,10	53,90	25,90	20,2	1,28	0,08	0,09	0,25	0,33	0,09	0,05	1
0,10 - 0,20	53,90	25,90	20,2	1,48	0,10	0,11	0,28	0,33	0,11	0,05	1
0,20 - 0,30	57,20	17,60	25,2	1,53	0,15	0,15	0,24	0,28	0,15	0,02	1
0,30 - 0,40	57,20	17,60	25,2	1,44	0,16	0,16	0,25	0,29	0,16	0,05	1
0,40 - 0,50	57,20	17,60	25,2	1,38	0,17	0,17	0,25	0,28	0,17	0,04	1
0,50 - 0,60	57,20	17,60	25,2	1,36	0,17	0,17	0,26	0,28	0,17	0,03	1
0,60 - 0,70	57,20	17,60	25,2	1,36	0,15	0,15	0,25	0,27	0,15	0,04	1
0,70 - 0,80	57,20	17,60	25,2	1,36	0,15	0,15	0,24	0,26	0,15	0,03	1
0,80 - 0,90	57,20	17,60	25,2	1,36	0,15	0,15	0,24	0,28	0,15	0,03	1
0,90 - 1,50	57,20	17,60	25,2	1,36	0,14	0,14	0,23	0,26	0,14	0,04	1

Tabela 5. Caracterização química inicial do solo por profundidade do Experimento 2, quantidade de nitrato (NO₃) e amônio (NH₄), pH (em água) e porcentagem de carbono orgânico (CO), São Carlos/SP.

Profundidade Unidade m	NO ₃ ppm	NH ₄ ppm	pH	CO %
0 - 0,10	9,0	10,0	5,5	2,0
0,10 - 0,20	9,0	10,0	5,5	1,6
0,20 - 0,30	7,0	8,0	6,2	1,4
0,30 - 0,40	7,0	8,0	6,2	1,1
0,40 - 0,50	5,0	6,0	6,2	1,0
0,50 - 0,60	5,0	0,0	6,3	0,8
0,60 - 1,00	5,0	0,0	6,3	0,7
1,00 - 2,00	2,8	0,02	6,3	0,4

No Experimento 2, a pastagem de capim-marandu foi avaliada a partir de sua implantação. Este experimento foi realizado em parcelas de 5 x 2 m, irrigadas, utilizando como critério de irrigação o fator de depleção igual a 25% da capacidade de água disponível ($f = 0,25$ CAD). O experimento foi conduzido no período de 27/04/2009 a 28/02/2010, com cortes da forragem a cada 35 dias e com nove ciclos de crescimento.

Durante o experimento a radiação solar média foi 17,3 MJ m⁻² d⁻¹, as temperaturas mínimas média e máxima média foram 16,2°C e 26,9°C, respectivamente, com acumulado anual de precipitação de 1494,4 mm, pela ausência de dados de velocidade do vento, foi adotado o valor padrão diário de 1 m s⁻¹.

Tabela 6. Datas dos ciclos de coleta e médias da radiação solar diária (RS), temperaturas máximas (T_{max}) e mínimas (T_{min}) e acumulados de precipitação pluvial (R) para cada ciclo de cultivo do Experimento 2, conduzido de 27/04/2009 a 28/02/2010, em São Carlos/SP.

Ciclo	Data início - final	RS MJ m ⁻² d ⁻¹	T _{max} °C	T _{min} °C	R mm
1	27/04 a 01/06/2009	15,73	25,41	14,19	36,60
2	01/06 a 05/07/2009	12,66	22,16	10,97	26,40
3	05/07 a 10/08/2009	14,34	25,04	13,63	61,60
4	10/08 a 14/09/2009	16,26	24,99	14,31	220,0
5	14/09 a 19/10/2009	18,10	27,03	15,81	115,8
6	19/10 a 23/11/2009	22,16	29,30	18,64	164,0
7	23/11 a 21/12/2009	17,88	27,16	18,59	336,2
8	21/12 a 25/01/2010	17,83	28,23	19,36	313,0
9	25/01 a 28/02/2010	21,16	32,75	20,16	220,8

As coletas de forragem foram realizadas apenas no final de cada ciclo de crescimento. A altura do resíduo foi de 0,25 m. Em cada avaliação da pastagem, foram coletadas duas subamostras por parcela para quantificação da massa de forragem acima do resíduo, utilizando uma moldura de 0,25 m² (0,5 x 0,5 m). Posteriormente, duas subamostras frescas, para cada parcela, foram tomadas: uma para realizar a separação morfológica (folha, colmo e material morto) e outra para determinar o teor de matéria seca da forragem. Uma vez realizada a separação morfológica, as frações representativas das folhas foram utilizadas para determinar a área foliar com um integrador de área foliar, modelo LI-3100C (Li-Cor, Lincoln, Nebraska, EUA). Com a área foliar e a área de onde a forragem foi colhida (0,25 m²), foram determinados o índice de área foliar (LAI) e a área foliar específica. Coletas de resíduo também foram realizadas ao final de cada ciclo, com a forragem sendo coletada da altura do resíduo até o nível do solo. A amostragem e o processamento das amostras de forragem do resíduo seguiram o mesmo protocolo descrito para a forragem acima do resíduo. Mais detalhes sobre este experimento podem ser obtidos em Cruz, (2010).

2.2.3. Parametrização para capim-marandu

A partir dos dados experimentais, foi realizada a parametrização do modelo APSIM-*Tropical Pasture* para o capim-marandu, a qual tomou como ponto de partida a parametrização de Bosi et al. (2020b) para o capim-piatã, e consistiu na adequação do submodelo de Fenologia. O qual, a partir das observações realizadas ao longo do Experimento 1, adequou-se o fotoperíodo crítico para modificação das fases fenológicas Vegetativas e Reprodutivas, após esse ajuste foram redistribuídas as frações de partição de biomassa para cada submodelo dos órgãos: Folha, Colmo, Coroa e Raiz.

Após isso, foram realizadas as alterações dos seguintes parâmetros dentro do submodelo da Folha: coeficiente de extinção da luz (k), eficiência do uso da radiação da planta inteira (RUEPI), temperatura basal inferior (T_b), SLA padrão, fator hídrico (Fw), partição de fotoassimilados entre os órgãos da planta, tempo de vida da folha e taxa de senescência de colmo e coroa.

O parâmetro k foi estimado a partir da porcentagem de interceptação da radiação e do LAI da pastagem irrigada do Experimento 1, utilizando a Lei de Beer-Lambert transformada para coberturas vegetais, conforme metodologia utilizada por Bosi et al. (2020b). A eficiência de uso da radiação (RUE) foi estimada a partir da

produtividade de matéria seca da pastagem irrigada do Experimento 1, da radiação global interceptada (RSi) por essa pastagem e de um fator de correção para a temperatura do ar (Ft), conforme Bosi et al. (2020b). A produtividade de matéria seca foi determinada somando-se o crescimento acima da altura de resíduo com o crescimento do resíduo. A RSi foi estimada somando-se a RSi medida acima do resíduo, com a RSi pelo resíduo, que foi estimada utilizando-se a Lei de Beer-Lambert, em função do LAI do resíduo e do k (BOSI et al., 2020a). A radiação global interceptada acima do resíduo foi calculada por meio das medições de três termosolarímetros calibrados com sensor padrão da estação meteorológica, um instalado acima do dossel forrageiro, para quantificar a radiação global incidente, e dois instalados à altura do resíduo, para medir a radiação transmitida pelo dossel acima daquela altura. O valor de Ft é dependente das variações da temperatura basal (Tb) inferior e da primeira temperatura ótima (To1) para a espécie, variando entre zero (0) e um (1), dependendo da comparação realizada. Para calcular a RUEPI, a RUE foi dividida por 0,8 levando-se em conta que 20% do acúmulo de matéria seca é destinado para o crescimento do sistema radicular (BOSI, 2017).

A Tb foi determinada a partir da metodologia de menor variabilidade de Arnold (1959). Foram atribuídos valores de 0 a 20°C, com intervalo de 0,1°C, para cálculo dos graus-dia, pela metodologia de (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002), utilizando a temperatura mínima e máxima de cada dia ao longo do experimento. Esses cálculos foram realizados apenas para os ciclos em que a interceptação luminosa alcançou 95% (MORENO et al., 2014). A temperatura que apresentou o menor desvio padrão foi adotada como a Tb para o capim-marandu. As temperaturas ótimas (To1 = 30.2°C, To2 = 40°C) e temperatura basal máxima (Tm = 45°C) foram obtidas do trabalho de PEQUENO; PEDREIRA; BOOTE, (2014).

Após essas modificações no processo de parametrização do modelo, foram adicionadas as informações de manejo dos experimentos (semeadura, adubação, irrigação, datas de corte e massa de folha e colmo no resíduo de cada corte). O segundo passo foi calibrar os demais parâmetros dos submodelos dos órgãos, em um processo de tentativa e erro, até que fossem atingidas as melhores estimativas possíveis para as variáveis monitoradas nos experimentos de campo.

2.2.4. Avaliação do desempenho do modelo

A avaliação do desempenho da parametrização do modelo, dos 'n' valores estimados (E) versus observados (O) foi realizada com o auxílio de alguns coeficientes, erros e índices. Os coeficientes utilizados para comparação foram: coeficiente de determinação (R²) e coeficiente de eficiência da modelagem (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Para a análise de erros foram considerados o erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE) e a raiz quadrada do erro médio (RMSE). Os índices utilizados foram: índice de concordância (d) de Willmott (WILLMOTT et al., 1985) e de confiança (c) de Camargo; Sentelhas (1997). Estes foram calculados conforme as equações de 1 a 6.

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

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

$$\text{MAE} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (|E_i - O_i|) \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2\right]} \quad (4)$$

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

$$c = \sqrt{R^2} \times d \quad (6)$$

2.3. Resultados

2.3.1. Parâmetros ajustados

Por meio do método de menor variabilidade de Arnold (1959), foi possível estimar a T_b , com valor igual a 10,3 °C (Figura 2.A.). O valor obtido para o parâmetro k foi de 0,66 e para RUEPI foi de 2,27 g MJ⁻¹. O valor de RUE apresentado na Figura 2.B, coeficiente angular (1,8181) está relacionado ao crescimento apenas da parte da planta acima do solo. Para se chegar ao valor de RUEPI, foi considerado que 20% do acúmulo de fotoassimilados foi utilizado para o crescimento radicular, assim, o valor de RUE de 1,8181 g MJ⁻¹ representa apenas 80% do crescimento da planta (BOSI, 2017).

Figura 2. A. Temperatura basal estimada para *Urochloa brizantha* cv. Marandu por meio do método da menor variabilidade de Arnold (1959) e desvio padrão (d), símbolo (■) com a temperatura a qual apresentou o menor desvio padrão = 10,3°C. **B.** Correlação entre acúmulo de forragem (folha + colmo) (g m⁻²) e radiação solar interceptada (Rs_i), MJ m⁻² para cálculo da eficiência do uso da radiação (RUE).

O modelo APSIM-*Tropical Pasture* possui uma estrutura de 8 fases fenológicas, conforme a Tabela 7. Os valores críticos de fotoperíodo para que haja mudança entre as fases vegetativas e reprodutivas foram ajustados conforme a observação da fenologia da cultura, nos experimentos. Estes foram correspondentes aos parâmetros ajustados por Bosi et al. (2020b) para outra cultivar da mesma espécie, o capim-piatã. Além disso, também foram ajustados os valores de partição de fotoassimilados entre os órgãos da planta, para cada fase fenológica (Tabela 7).

Tabela 7. Fases fenológicas, fotoperíodo crítico (h) para mover para a próxima fase e partição de matéria seca (DM) entre os órgãos da planta, calibrada para o capim-marandu.

Número	Fases fenológicas	Fotoperíodo(h)	Fração de Partição			
			Folha	Raiz	Colmo	Coroa
0	Germinação		0,50	0,33	0,07	0,1
1	Emergência		0,50	0,30	0,15	0,05
2	Juvenil		0,55	0,20	0,17	0,08
3	Vegetativa1	13,0	0,55	0,20	0,17	0,08
4	Reprodutiva1	12,5	0,65	0,04	0,25	0,06
5	Reprodutiva2	11,4	0,55	0,05	0,35	0,05
6	Reprodutiva3	11,0	0,55	0,01	0,35	0,09
7	Vegetativa2*	10,7	0,55	0,20	0,15	0,10

*Depois da fase Vegetativa2, um mecanismo *GoToPhase* move a simulação para a fase Vegetativa1, promovendo a simulação em ciclo para pastagens perenes.

No conjunto de dados coletados no Experimento 1, não constavam os dados oriundos do crescimento inicial do capim, porém a simulação foi iniciada na data de semeadura e os dados apresentados são da época do experimento, quando a pastagem se encontrava estabelecida e com mais de um ano e meio de idade. Nesse período, foi observado um ciclo fenológico completo, entre as fases vegetativas e reprodutivas, como apresentado na Figura 3. O capim-marandu possui um longo período irregular de florescimento, e, por meio desse experimento, foi possível observar que no início ocorre com o aumento do fotoperíodo para 13 h e se estende até o decréscimo do fotoperíodo a 11 h.

Figura 3. Fases fenológicas conforme o fotoperíodo ao longo dos ciclos de crescimento do Experimento 1, conduzido entre os anos de 2017 e 2018, em Piracicaba/SP.

Nas Tabelas 8 a 11 são apresentados os parâmetros que compõem o modelo *APSIM-Tropical Pasture*, separados por órgão da planta: folha, colmo, coroa e raiz. Dentre os parâmetros da folha, foram modificados, como relatado anteriormente, os valores de alguns parâmetros de cálculo da fotossíntese (RUEPI, Ft, por meio da alteração

da Tb, e Fw), a partição de fotoassimilados, o tempo de vida da folha (potencial e os fatores de penalização por LAI e florescimento) e SLA padrão (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros do submodelo folha do modelo APSIM-*Tropical Pasture* calibrado para o capim-marandu. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma variável (x) e os valores do fator correspondentes (y).

Parâmetro	Unidade	Valor
Massa inicial da planta	g planta ⁻¹	0,01
Massa inicial de folha	g planta ⁻¹	0,01
Fração estrutural de folha	0-1	1
Coeficiente de extinção da luz (k)	---	0,66
Concentração máxima de N na folha	g g ⁻¹	0,021
Concentração mínima de N na folha	g g ⁻¹	0,005
Interruptor da demanda de N	0-1	1
Fator de realocação de N	Fração (0–1) d ⁻¹	0,5
Tempo para queda da folha	dias	30
Eficiência de uso da radiação da planta inteira	g MJ ⁻¹	2,27
Fator de temperatura (Ft)	X: temperatura (°C) Y: valor de Ft	X: 10,3; 30,2; 40; 45 Y: 0; 1; 1; 0
Fator de déficit de pressão de vapor (Fvpd)	X: def. press. vapor Y: valor de Fvpd	X: 0; 10; 50 Y: 1; 1; 1
Fator de Nitrogênio (Fn)	X: Valor de Fn da folha Y: valor de Fn	X: 0; 1 Y: 0; 1
Fator de déficit hídrico (Fw)	X: suprimento/demanda Y: valor de Fw	X: 0; 0,8; 1 Y: 0; 1; 1
Função de morte de folhas por geada	X: T mínima (°C) Y: Fração morta	X: 0; 2 Y: 1; 0
Tempo de vida da folha (LRT)	dias	50
Fator de LAI sobre LRT	X: LAI Y: Valor do fator	X: 0; 5; 6; 7 Y: 1; 1; 0,9
Fator de florescimento sobre LRT	X: Fase fenológica Y: Valor do fator	X: 0; 4; 5; 6; 7 Y: 1; 1; 0,9; 0,7; 1
SLA* padrão	X: Idade da planta Y: SLA (m ² g ⁻¹)	X: 0; 0,3; 0,6; 0,7; 2 Y: 0,017; 0,018; 0,02; 0,023; 0,023
Fator de água sobre a SLA	X: suprimento/demanda Y: Valor do fator	X: 0; 0,8; 1 Y: 0; 1; 1
Função de altura	X: Massa viva (g m ⁻²) Y: altura dossel (mm)	X: 0; 100; 1000 Y: 0; 100; 700
Concentração de carbono na folha	g g ⁻¹	0,4

*Área foliar específica (SLA)

O fator hídrico sobre a fotossíntese e o fator hídrico sobre a SLA foram alterados de forma a representar que o capim-marandu sofre influência do déficit hídrico quando a razão suprimento: demanda de água é menor que 0,8, sugerindo que o capim-marandu sofre menor restrição de crescimento devido ao déficit hídrico, em comparação com o capim-piatã, parametrizado por Bosi et al. (2020b). O valor potencial para o tempo de vida da folha (LRT) foi alterado para 50 dias, demonstrando que o capim-marandu possui senescência de folhas mais acelerada que o capim-piatã. Além disso, o efeito do LAI sobre o LRT foi diminuído, representando um menor efeito do auto

sombreamento em acelerar a senescência de folhas, e o efeito da fenologia sobre o LRT foi alterado, acrescentando maior efeito na fase Reprodutiva2 e suprimindo seu efeito na fase Vegetativa2.

Os parâmetros dos submodelos colmo, coroa e raiz (Tabela 9 a 11) não foram modificados da sua forma inicial, parametrizada por Bosi et al. (2020b), exceto os parâmetros relacionados à partição de fotoassimilados para os três órgãos (Tabela 7) e à taxa de senescência de colmo e coroa (Tabelas 9 e 10). Dessa forma, a taxa de senescência de colmo foi aumentada para as fases reprodutivas e diminuída para a fase Vegetativa2, enquanto a senescência de coroa foi reduzida para as fases Reprodutiva3 e Vegetativa2, em comparação com a parametrização para capim-piatã (BOSI et al., 2020b).

Tabela 9. Parâmetros do submodelo colmo do modelo APSIM-*Tropical Pasture*, calibrado para o capim-marandu. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma variável (x) e os valores do fator correspondentes (y).

Parâmetro	Unidade	Valor
Fator de realocação de N do colmo	Fração (0–1) d ⁻¹	0,0
Fator de translocação de N do colmo	Fração (0–1) d ⁻¹	0,0
Concentração máxima de N	g g ⁻¹	0,003
Concentração mínima de N	g g ⁻¹	0,001
Massa inicial de colmo	g m ⁻²	0,0
Fração estrutural de colmo	(0-1)	1,0
Taxa de queda de colmo	Fração (0–1) d ⁻¹	0,01
Eficiência da conversão de DM* no colmo	(0-1)	1,0
Interruptor da demanda de N	(0-1)	1,0
Taxa de senescência de colmo	X: fase fenológica Y: taxa de senescência	X: 0, 3, 4, 5, 6, 7 Y: 0,005; 0,005; 0,01; 0,025; 0,025; 0,05
Concentração de carbono no colmo	g g ⁻¹	0,4

*Matéria seca (DM)

Tabela 10. Parâmetros do submodelo coroa do modelo APSIM-*Tropical Pasture*, calibrado para o capim-marandu. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma variável (x) e os valores do fator correspondentes (y).

Parâmetro	Unidade	Valor
Fator de realocação de N da coroa	Fração (0–1) d ⁻¹	0,0
Fator de translocação de N da coroa	Fração (0–1) d ⁻¹	0,0
Concentração máxima de N	g g ⁻¹	0,003
Concentração mínima de N	g g ⁻¹	0,001
Massa inicial de coroa	g m ⁻²	0,0
Fração estrutural da coroa	(0-1)	0,5
Taxa de senescência da coroa	Fração (0–1) d ⁻¹	0,01
Eficiência da conversão de DM* na coroa	(0-1)	1,0
Interruptor da demanda de N	(0-1)	1,0
Taxa de senescência da coroa	X: Fase fenológica Y: taxa de senescência	X: 0; 4; 7 Y: 0,005; 0,005; 0,005
Concentração de carbono na coroa	g g ⁻¹	0,4

*Matéria seca (DM)

Tabela 11. Parâmetros do submodelo raiz do modelo *APSIM-Tropical Pasture*, calibrado para o capim-marandu. Parâmetros com vários valores representam uma série de valores de uma variável (x) e os valores do fator correspondentes (y).

Parâmetro	Unidade	Valor
Velocidade de crescimento da raiz	mm d ⁻¹	20
Taxa de senescência da raiz	Fração (0-1) d ⁻¹	0,001
Concentração máxima de N	g g ⁻¹	0,003
Concentração mínima de N	g g ⁻¹	0,001
Absorção diária de N máxima	g plant ⁻¹	6
Profundidade máxima da raiz	mm	10000
Fração estrutural da raiz	(0-1)	0,8
Modificador da absorção de água (KL)	X: LAI	X: 0; 5; 10
	Y: fator de valor	Y: 1, 1, 1
Modificador de absorção de NO ₃ (KNO ₃)	X: densidade do comprimento da raiz	X: 0; 0,003
	Y: NO ₃ absorção	Y: 0,3; 0,3
Modificador de absorção de NH ₄ (KNH ₄)	X: densidade do comprimento da raiz	X: 0; 0,003
	Y: NH ₄ absorção	Y: 0; 0
Massa inicial de raízes	g plant ⁻¹	0,02
Comprimento específico de raiz	m g ⁻¹	100
Interruptor da demanda de N	(0-1)	1
Concentração de carbono nas raízes	g g ⁻¹	0,4

2.3.2. Simulações para o Experimento 1

Os valores das estatísticas para a comparação entre as estimativas e os valores observados das variáveis da pastagem são apresentados na Tabela 12. Dentre as variáveis analisadas, as melhores respostas do coeficiente de determinação, tanto para as parcelas em Sequeiro (R) e Irrigado (I), foram para biomassa viva, com $R^2 = 0,75$ (R) e 0,84 (I); massa de folha viva, com $R^2 = 0,86$ (R) e 0,86 (I); altura, com $R^2 = 0,70$ (R) e 0,64 (I), LAI, com $R^2 = 0,80$ (R) e 0,75 (I), e massa de coroa, com $R^2 = 0,98$ (R) e 0,53 (I). A melhor exatidão, medida pelo coeficiente “d” de Willmott foi apresentada para as estimativas da massa de folhas ($d > 0,94$), e pelo coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe, também para massa de folhas ($NSE > 0,65$).

As piores estimativas foram para o sistema em sequeiro a massa de material morto e consequentemente para a biomassa total (Folha + Colmo + Coroa + material morto). Também para essas duas variáveis, os maiores erros foram observados no sequeiro. A estimativa de SLA apresentou baixos índices na simulação para o sistema irrigado.

Tabela 12. Análises estatísticas entre os dados observados (O) em campo do capim-marandu e os estimados (E) pelo modelo APSIM-*Tropical Pasture*, para o Experimento 1, conduzido entre 2017 e 2018 nos tratamentos (Trat.) Sequeiro (S) e Irrigado (I) em Piracicaba/SP. Média da série O e E; Índice de concordância (d) de Willmott, coeficiente de determinação (R^2), Índice de confiança (c), coeficiente de eficiência da modelagem (NSE), valores médios, erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE) raiz quadrada do erro-médio (RMSE).

Variável	Trat.	Média O	Média E	d	R^2	c	NSE	ME	MAE	RMSE
Unidade		Unidade da variável			Sem unidade			Unidade da variável		
Biomassa Total (g m^{-2})	S	1030,29	666,05	0,47	0,10	0,15	-2,07	-361,78	370,90	443,19
	I	898,13	754,24	0,77	0,71	0,65	-0,02	-147,15	152,86	174,11
Biomassa viva (g m^{-2})	S	463,48	465,32	0,91	0,75	0,79	0,54	2,64	69,79	86,60
	I	489,97	535,80	0,94	0,84	0,86	0,70	31,98	50,51	68,16
Massa de folha (g m^{-2})	S	181,55	191,22	0,94	0,86	0,87	0,65	10,31	41,22	54,22
	I	212,36	228,30	0,95	0,86	0,89	0,77	5,39	32,09	41,11
Massa de colmo (g m^{-2})	S	125,83	128,36	0,84	0,50	0,60	0,41	2,51	23,87	29,07
	I	125,00	132,10	0,83	0,48	0,57	0,35	4,24	22,94	28,47
Massa de coroa (g m^{-2})	S	170,59	145,84	0,87	0,98	0,87	0,72	-2,71	14,80	19,67
	I	183,82	175,39	0,73	0,53	0,53	0,02	22,49	26,18	31,38
Índice de área foliar*	S	3,62	3,99	0,93	0,80	0,83	0,69	0,36	0,97	1,29
	I	4,72	5,01	0,92	0,75	0,80	0,67	0,29	1,00	1,26
Área foliar específica ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	S	0,020	0,020	0,83	0,49	0,58	0,35	-2E-04	2E-03	2E-03
	I	0,022	0,022	0,33	0,01	0,04	-0,04	4E-04	2E-03	3E-03
Massa de material morto (g m^{-2})	S	558,14	200,75	0,46	0,11	0,15	-3,04	-354,97	354,97	402,21
	I	400,45	218,44	0,43	0,49	0,30	-5,26	-180,99	180,99	189,15
Altura do dossel (mm)	S	331,92	335,02	0,91	0,70	0,76	0,70	4,30	48,06	68,87
	I	351,46	380,61	0,88	0,64	0,70	0,59	24,07	54,28	71,92

*LAI - Índice de área foliar sem unidade

As estimativas que obtiveram os melhores índices estão apresentadas na Figura 4 (A. a D.) plotadas juntamente com a reta 1:1 para visualização do comportamento de exatidão (proximidade com a reta 1:1) e precisão (R^2) das simulações. A série de dados ao longo do tempo para biomassa viva, a qual compreende a somatória de folha, colmo e coroa, está apresentada na Figura 5.

O módulo *SoilWat* da plataforma APSIM calcula a evaporação do solo em dois estádios. No primeiro, o solo está com máximo conteúdo de água e a evaporação do solo é pelo menos igual à taxa potencial de evaporação. No segundo estágio, enquanto o conteúdo de água do solo diminui ao longo do tempo, a evaporação do solo será menor que a evaporação potencial. Esses estádios são representados por dois coeficientes, denominados de U e ConA os quais podem ser modificados conforme o período do ano (verão e inverno) (APSIM, 2020).

Por meio da análise de dois períodos distintos ao longo da simulação (Figura 6), observou-se que os valores do modelo padrão não representavam a realidade para o solo (Nitossolo vermelho eutroférico latossólico) conduzido com cultura de dossel contínuo (capim-marandu), presentes na área do Experimento 1. No modelo padrão, o valor de U, o qual representa a evaporação máxima acumulada do solo no final do primeiro estágio é igual ao valor de 6 mm (durante o verão) como apresentado na Tabela 13. Nas estimativas do presente estudo, em nenhum dos períodos esse valor é alcançado (Figura 6), possivelmente pela evaporação do solo ser menor em

culturas que cobrem totalmente o solo, considerada nula em alguns casos (SOUZA, 2017; SANCHES, 2018; SANCHES et al., 2019).

Figura 4. Relação entre os dados observados do capim-marandu nos tratamentos: Irrigado (●) e Sequeiro (◆) no Experimento 1, conduzido entre 2017 a 2018 em Piracicaba/SP e os estimados pelo modelo. A. Massa de material vivo (g m^{-2}); B. Folha viva (g m^{-2}); C. Colmo vivo (g m^{-2}); D. Índice de Área Foliar (g m^{-2}).

Figura 5. Série dos dados observados e estimados para a biomassa viva do capim-marandu, Irrigado (●) e Sequeiro (◆) e fator de déficit hídrico nos dois sistemas: Irrigado (—) e Sequeiro (- - -) durante o Experimento 1, conduzido entre 2017 a 2018 em Piracicaba/SP.

Figura 6. Evaporação acumulada no solo dias depois de uma chuva em dois períodos durante o Experimento 1, conduzido entre 2017 e 2018, em Piracicaba/SP.

Uma segunda modificação do módulo *SoilWat* foi no coeficiente de difusividade do solo e em sua variação conforme a mudança da umidade do solo, o qual pelo modelo padrão, considera o valor de $88 \text{ mm}^2 \text{ dia}^{-1}$ e $35,4 \text{ mm}^{-1}$ respectivamente (Tabela 13). Contudo, o próprio diretório do APSIM (APSIM, 2020) recomenda a alteração para $40 \text{ mm}^2 \text{ dia}^{-1}$ e 16 mm^{-1} respectivamente, em caso de solos argilosos com rachaduras (Tabela 1), sendo que o solo da área contem em média 54,6% de argila e apresenta rachaduras após seu secamento.

Tabela 1. Parâmetros padrão do módulo APSIM-*SoilWat* após o ajuste para um Nitossolo do Experimento 1.

Descrição	Valor padrão	Valor ajustado
Data de início no verão para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	1-Out	1-Out
Acumulado de evaporação de água no solo ao chegar ao final do estágio 1 de evaporação no verão (a.k.a. U) (mm)	6	2
Coeficiente de drenagem para o estágio 2 da evaporação da água no solo no verão (a.k.a. ConA)	3,5	1,1
Data de início no inverno para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	1-Abr	1-Abr
Acumulado de evaporação de água no solo ao chegar ao final do estágio 1 de evaporação no inverno (a.k.a. U). (mm)	3	1
Coeficiente de drenagem para o estágio 2 da evaporação da água no solo no inverno (a.k.a. ConA)	1,5	0,4
Constante de difusividade de água no solo ($\text{mm}^2 \text{ day}^{-1}$)	88	40
Efeito da umidade do solo acima do ponto de murcha permanente sobre a difusividade da água no solo ($1/\text{mm}^{-1}$)	35,4	16

As respostas quanto à umidade do solo simulada pelo módulo *SoilWat* do APSIM foram obtidas ajustando os parâmetros físicos do solo originados a partir da curva de retenção da água do solo e os visualizados a campo por medição da sonda FDR marca comercial Diviner®. Foram ajustados o ponto de murcha permanente (LL15), a capacidade de campo (DUL) e o ponto de saturação (SAT). A partir disso, foi possível comparar o conteúdo de água no solo observado por meio do sensor FDR com o estimado pelo modelo, gerando os índices e erros apresentados na Tabela 14.

Tabela 2. Análises estatísticas entre os dados observados (O) de umidade do solo em campo por profundidade (Prof.) e estimados (E) pelo módulo APSIM-*SoilWat*, para o capim-marandu no Experimento 1, conduzido entre 2017 e 2018 em Piracicaba/SP. Média da série de dados O e E; índice de concordância (d) de Willmott, coeficiente de determinação (R^2), índice de confiança (c), erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE), raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e coeficiente de eficiência da modelagem (NSE).

Prof.	Trat.	Média		d	R^2	c	ME	MAE	RMSE	NSE
		O	E							
Unidade	--	mm		--	--	--		mm		--
0 - 0,10 m	S	31,97	32,99	0,91	0,71	0,77	1,02	2,00	2,87	0,65
	I	36,90	36,30	0,78	0,51	0,56	-0,60	1,15	1,44	-0,16
0,10 - 0,20 m	S	32,08	32,70	0,96	0,91	0,91	0,62	1,39	1,67	0,76
	I	34,84	35,75	0,64	0,50	0,45	0,92	1,07	1,28	-2,55
0,20 - 0,30 m	S	32,32	32,79	0,96	0,90	0,91	0,47	0,60	0,76	0,82
	I	33,90	33,99	0,70	0,27	0,36	0,10	0,30	0,42	-0,39
0,30 - 0,40 m	S	33,18	33,31	0,96	0,85	0,89	0,12	0,56	0,78	0,84
	I	34,82	34,56	0,58	0,14	0,21	-0,26	0,65	0,83	-0,89
0,40 - 0,50 m	S	35,00	35,06	0,92	0,83	0,84	0,06	0,51	0,61	0,53
	I	35,68	35,82	0,72	0,32	0,41	0,14	0,43	0,56	-0,15
0,50 - 0,60 m	S	36,49	36,14	0,92	0,82	0,83	-0,35	0,93	1,12	0,54
	I	36,24	37,26	0,51	0,35	0,30	1,02	1,29	1,47	-7,65
0,60 - 0,70 m	S	33,98	34,40	0,87	0,67	0,72	0,42	0,90	1,19	0,33
	I	34,75	35,11	0,47	0,39	0,29	0,36	1,19	1,37	-13,36
0,70 - 0,80 m	S	32,34	32,51	0,87	0,61	0,68	0,17	0,39	0,57	0,43
	I	32,46	32,80	0,60	0,35	0,36	0,33	0,57	0,69	-3,73
0,80 - 0,90 m	S	31,24	31,24	0,86	0,68	0,71	-0,01	0,50	0,66	0,13
	I	31,47	31,63	0,48	0,32	0,27	0,17	0,66	0,81	-10,02
0,0 - 0,30 m	S	96,37	98,48	0,96	0,88	0,90	2,11	3,09	4,34	0,80
	I	105,63	106,05	0,82	0,56	0,61	0,42	1,82	2,30	-0,08
0,0 - 0,60 m	S	201,05	202,99	0,97	0,92	0,93	1,94	4,25	5,41	0,85
	I	212,37	213,68	0,78	0,59	0,60	1,31	3,08	3,94	-0,69
0,0 - 0,90 m	S	298,61	301,14	0,97	0,93	0,93	2,53	5,43	6,78	0,83
	I	311,05	313,22	0,73	0,62	0,57	2,17	4,73	6,09	-1,93

De modo geral, as simulações para o sistema Sequeiro apresentaram resultados mais precisos e exatos que a do sistema Irrigado. Isso pode ser explicado pela menor variação do conteúdo de água em todas as camadas do solo no sistema Irrigado, em relação ao sistema Sequeiro (Figura 7). Isso provocou maior dispersão dos dados em torno da reta média (Figura 8), resultando em menores valores dos índices d, R^2 , c e NSE para as estimativas do Irrigado em relação ao Sequeiro. A análise dos erros indicou que o sistema Irrigado apresentou menores valores em relação ao Sequeiro em várias profundidades (Tabela 14).

Figura 7. Série de dados do conteúdo de água no solo (mm) observado (Obs) e estimado (Est) pelo módulo APSIM-*SoilWat* em cada grupo de profundidade: Sequeiro (○) e Irrigado (●) de 0 a 0,90 m, Sequeiro (◻) e Irrigado (◼) de 0 a 0,60 m e Sequeiro (▲) e Irrigado (▲) de 0 a 0,30 m, para o Experimento 1, conduzido entre 2017 e 2018, em Piracicaba/SP.

Figura 8. Relação entre os dados observados de conteúdo de água no solo e os estimados pelo módulo APSIM-*SoilWat*, para cada tratamento e grupo de profundidade: **A.** Sequeiro (▲) e Irrigado (▲) de 0 a 0,30 m, **B.** Sequeiro (◻) e Irrigado (◼) de 0 a 0,60 m, e **C.** Sequeiro (○) e Irrigado (●) de 0 a 0,90 m, no Experimento 1, conduzido entre 2017 e 2018, em Piracicaba/SP.

2.3.3. Simulações para o Experimento 2

No Experimento 2, conduzido em São Carlos/SP, a coleta de dados foi realizada apenas no primeiro ano após a semeadura da pastagem, ou seja, durante o estabelecimento desta. Isso resultou em um período de simulação

no qual o ciclo fenológico da planta não foi completo, não havendo ocorrência das fases fenológicas Reprodutiva3 e Vegetativa2, como demonstrado na Figura 9.

Figura 9. Fases fenológicas determinadas pelo fotoperíodo para o capim-marandu, durante o Experimento 2, conduzido entre os anos de 2009 e 2010, em São Carlos/SP.

A partir das avaliações produtivas e biométricas realizadas no Experimento 2, foi possível avaliar a simulação do modelo para essas variáveis. Os valores das estatísticas para essa comparação estão apresentados na Tabela 15. As simulações para as variáveis LAI e SLA apresentaram performance ruim, com valores de $d = 0,28$ e $0,22$; e $R^2 = 0,47$ e $0,09$, respectivamente, apresentando maiores erros em relação às estimativas para o Experimento 1. Diferentemente ao conjunto de dados do Experimento 1, a massa de material morto apresentou melhor precisão ($R^2 = 0,83$) e menores erros, acarretando também em uma melhor estimativa de massa total em relação às simulações para o Experimento 1. Outra variável que apresentou melhor resultado foi a massa de colmo, com valor de RMSE próximo ao observado na simulação para o Experimento 1, porém com maior erro médio (ME) e erro absoluto médio (MAE).

Tabela 3. Análises estatísticas entre os dados observados (O) em campo do capim-marandu e estimados (E) pelo modelo APSIM-Tropical Pasture, para o Experimento 2, conduzido entre 2009 e 2010 em São Carlos/SP. Média da série de dados O e E; índice de confiança (c), índice de concordância (d) de Willmott, coeficiente de determinação (R^2), erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE), raiz quadrada do erro-médio (RMSE) e coeficiente de eficiência da modelagem (NSE).

Variável	Média		d	R^2	c	ME	MAE	RMSE	NSE
	O	E							
Unidade	g m ⁻² ou m ² g		--	--	--	g m ⁻² ou m ² g ⁻¹ (SLA)			--
Biomassa total	816,50	794,87	0,86	0,83	0,78	-21,64	229,94	257,54	0,68
Biomassa viva	583,52	594,14	0,80	0,65	0,65	10,62	157,05	185,67	0,57
Massa de folha	308,43	305,26	0,80	0,55	0,59	-3,16	73,74	86,34	0,53
Massa de colmo	181,83	162,06	0,83	0,83	0,76	-19,77	55,65	68,94	0,63
Massa de coroa	93,26	126,81	0,67	0,51	0,48	33,55	45,15	51,34	0,06
Índice de área foliar*	4,53	6,31	0,71	0,64	0,57	1,79	1,79	2,12	-0,83
Área foliar específica	0,02	0,02	0,30	0,15	0,12	0,003	0,003	0,004	-19,62
Material morto	232,98	200,73	0,88	0,86	0,81	-32,25	73,56	97,21	0,71

*Índice de área foliar sem unidade

Na Figura 10 são apresentados os gráficos de correlação entre as variáveis com melhores índices de R^2 . Observa-se que a melhor estimativa de massa total foi em resposta à boa precisão de simulação do material morto (Figura 10. D.).

Figura 10. Relação entre os dados observados para o capim-marandu irrigado, no Experimento 2, em São Carlos/SP, e os estimados pelo modelo APSIM-Tropical Pasture. A. Biomassa total, B. biomassa viva, C. Massa de colmo, e D. Massa de material morto.

2.4. Discussão

Utilizando-se o modelo *APSIM-Tropical Pasture*, foi possível realizar a calibração e a alteração dos parâmetros do submodelo folha, da partição de matéria seca entre os órgãos da planta: folha, colmo, coroa e raiz, e da taxa de senescência dos mesmos órgãos. Em relação aos parâmetros para estimativa da fotossíntese, calibrados nesse trabalho, a eficiência de uso da radiação (RUE) foi de 2,27 g MJ⁻¹, próxima ao valor obtido por Pezzopane et al. (2018), que observaram valor máximo de 2,07 g MJ⁻¹. O modelo inicialmente calibrado para a *U. brizantha* cv. BRS Piatã por Bosi et al. (2020b) indica o valor de 1,44 g MJ⁻¹, ambas as estimativas para a cultivar Marandu encontraram valores acima dos para a cultivar Piatã. Araujo et al. (2013) encontrou valores de 1,95 g MJ⁻¹ para *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça.

A temperatura basal (Tb), calculada no Experimento 1, foi de 10,3°C. Pezzopane et al. (2018), calcularam a Tb pelo mesmo método utilizado nesse trabalho e obtiveram o valor de 10,6°C. Pedreira et al. (2011) adaptou o modelo *CROPGRO-Perennial Forage* para a simulação do capim-xaraés e, com a otimização dos parâmetros, adotou o valor de 10°C para Tb. Pequeno et al. (2018) encontraram valores de 11,1°C para o capim-marandu e 10°C para *Brachiaria* híbrida cv. Mulato II. Bosi et al. (2020a) obteve o valor de 8,9°C para o capim-piatã.

O coeficiente de extinção (k), obtido nesse estudo, foi semelhante ao de Pezzopane et al. (2018), com valores de 0,66 e 0,659, respectivamente enquanto que Bosi et al. (2020b) encontraram o valor de 0,65. Em comparação aos demais parâmetros, o k é o que apresentou menores divergências quanto aos valores na literatura.

A calibração das fases fenológicas da planta não apresentou diferenças significativas entre as cultivares Marandu e BRS Piatã, sendo que, esse resultado era esperado, pois ambas pertencem à mesma espécie. A *U. brizantha* tem o seu florescimento em um grande período do ano, sendo que no início do Experimento 1 observou-se algumas plantas com colmos alongados e inflorescências, provavelmente reflexo do período de crescimento livre anterior ao corte de inicialização do experimento.

Como observado em literatura (PAULA et al., 2012; MEDICA; REIS; SANTOS, 2017; BOSI et al., 2020a), o maior florescimento do capim-marandu ocorre quando o fotoperíodo está decrescente, com início ainda em fotoperíodo crescente estendendo-se até sua redução para 11h (Figura 3). O Experimento 2 só apresentou inflorescências a partir do sexto ciclo, com o aumento do fotoperíodo acima de 13h (Figura 9). No trabalho original, CRUZ (2010) observou diferença na data de início do florescimento entre a cultura em crescimento livre e sob corte para três cultivares de *B. brizantha* (Marandu, Xaraés e BRS Piatã), em fase de estabelecimento, sendo que, sob corte, apresentaram retardamento do início do florescimento.

No submodelo de folha foram alterados o cálculo da SLA padrão em relação à idade da planta, estabelecendo o valor de 0,023 m² g⁻¹ após a cultura alcançar 0,7 anos de idade. A parametrização para a cultivar BRS Piatã considera a SLA padrão após 0,7 anos de idade de 0,020 m² g⁻¹ Bosi et al. (2020b). Além disso, o valor de SLA padrão no início do desenvolvimento da pastagem foi fixado em 0,017 m² g⁻¹ para o capim-marandu e 0,015 m² g⁻¹ para o capim-piatã. Em outra calibração, para o modelo *CROPGRO-Perennial Forage*, os limites adotados para a SLA padrão foram de 0,013 a 0,0358 m² g⁻¹, considerando alta e baixa incidência de luz sob as folhas, respectivamente (PEDREIRA et al., 2011). Além disso, no presente trabalho, foi alterado o efeito do fator hídrico sobre os cálculos da SLA e da fotossíntese (Tabela 8), considerando que as respostas ao déficit hídrico são diferentes entre as cultivares Marandu e BRS Piatã. Dessa forma, o fator hídrico só penaliza o crescimento do capim-marandu quando a razão entre suprimento e demanda de água é menor que 0,8, valor que está de acordo com o observado por Pezzopane et al. (2018).

Quanto ao crescimento dos órgãos da planta, a simulação da massa de folha e colmo foram as que apresentaram melhores resultados, considerando os dois experimentos. Em comparação a outras parametrizações para forrageiras tropicais que utilizaram o modelo CROPGRO-*Perennial Forage*, uma série de autores observam menores valores de RMSE em relação ao presente trabalho (PEDREIRA et al., 2011; LARA et al., 2012; PEQUENO; PEDREIRA; BOOTE, 2014; PEQUENO et al., 2018; BOSI et al., 2020b). Esse trabalho obteve RMSE na estimativa de folha de 542,2 kg DM ha⁻¹ (Sequeiro) e 411,1 kg DM ha⁻¹ (Irrigado) para o Experimento 1 (Tabela 12), enquanto outros trabalhos obtiveram RMSE de 291 a 521 kg DM ha⁻¹ (PEDREIRA et al., 2011; LARA et al., 2012; PEQUENO; PEDREIRA; BOOTE, 2014; PEQUENO et al., 2018; BOSI et al., 2020b).

No trabalho de (BOSI et al., 2020b), os autores observaram maior RMSE para estimativa da massa de folha em sistema de corte irrigado (RMSE = 521,5 kg DM ha⁻¹) em relação ao sistema de pastejo (RMSE = 309,5 kg DM ha⁻¹). Possivelmente, os maiores valores de RMSE do presente trabalho, estão associados ao manejo por corte, sendo que isso é mais evidente durante o período estacional na planta (Figura 5). Também em sistema sob corte, Santos et al. (2019), observaram RMSE de 450 a 693 kg DM ha⁻¹ na estimativa de biomassa total, valores maiores do que os apresentados no presente trabalho (Tabela 12).

Com exceção da massa de coroa e do LAI, as estimativas das características produtivas e biométricas, apresentaram menores erros (ME, MAE e RMSE) para o sistema Irrigado (Tabela 12). Padrão semelhante para as variáveis massa de folha, biomassa viva, LAI e SLA foi observado em outros trabalhos, considerando os valores de RMSE (PEQUENO; PEDREIRA; BOOTE, 2014; PEQUENO et al., 2018; BOSI et al., 2020b). Entretanto, ao avaliar o índice de concordância “d”, percebe-se que a variável SLA é melhor estimada no sistema Sequeiro, sendo esse fato observado no Experimento 1 e nos trabalhos de Pequeno et al. (2018) e Bosi et al. (2020a). No geral, a variável SLA precisa ser melhor estudada, pois observa-se baixos índices de estimativa da mesma, por ser muito influenciada pelas condições de luminosidade (GUENNI; JÁUREGUI, 2015), em função da sobreposição das folhas em campo, e também devido a erros na medição dessa variável, que podem estar relacionados ao enrolamento de folhas e erros de coleta (BOSI et al., 2020b), bem como com o tempo entre a colheita e a medição da área foliar.

A estimativa de material morto apresentou baixos índices de concordância e de eficiência da modelagem para o Experimento 1 (Tabela 12). Em relação ao Experimento 2 (Tabela 15), a massa de material morto foi mais bem simulada até os 246 dias, a qual envolve o estabelecimento e alguns ciclos de crescimento até o final do período de primavera e começo do aumento de biomassa de parte aérea e maior sombreamento do solo. Problemas na estimativa do material morto pelo APSIM estão muito relacionados a problemas na simulação da decomposição da palhada e do desprendimento do material morto da planta, por isso não é considerado para as respostas em simulação com forrageiras tropicais (BOSI et al., 2020b; GOMES et al., 2020).

Na comparação aos modelos das plataformas DSSAT e WAVE, para a calibração do conteúdo da água no solo em solo sem cultura, Soldevilla-Martinez et al. (2014) observaram valores para as camadas de 0,1 m e 0,4 m com coeficiente NSE maior para a camada mais superficial, aproximadamente 0,97 para ambos os modelos, em relação a camada de 0,40 m com NSE de 0,821 (DSSAT) e 0,857 (WAVE) e com valores de RMSE com valores menores que 0,014 cm³cm⁻³. Os dados desse trabalho, apresentaram valores de RMSE de 0,004 a 0,07 (Tabela 14), maiores em relação ao trabalho citado anteriormente. Na pesquisa de Soldevilla-Martinez et al. (2014) o experimento foi realizado em solo sem cultura, isso resulta em simulações mais precisas, uma vez que não se tem a planta interferindo nas taxas de transpiração. Também pode-se afirmar que a simulação é mais exata nas camadas superficiais, onde apresentam maior NSE. Na simulação do conteúdo da água do solo com culturas, podem ser

encontrados erros maiores em relação ao solo descoberto, com RMSE em torno de 3 a 6,2 % em volume, com NSE = 0,49 a 0,89 e índice d de 0,63 a 0,87 (JEMG et al., 2017; VIANNA, 2018; SANTOS et al., 2019).

2.5. Conclusão

O modelo *APSIM-Tropical Pasture* é capaz de simular o crescimento e as respostas produtivas do capim-marandu conduzido em sistema de irrigação e sequeiro, sob manejo por corte. Além disso, foi possível definir a transição entre os períodos fenológicos da cultivar e avaliar as respostas quanto ao conteúdo de água em solo argiloso e com culturas que cobrem totalmente o solo.

As respostas da simulação necessitam ser aprimoradas quanto a estimativa do material morto, principalmente na sua taxa de decomposição, devido a subestimativas do modelo, principalmente em locais com pastagens estabelecidas. Além disso, é necessário o aprimoramento do estudo da área foliar específica do dossel forrageiro, pelo fato da mesma ser sensível às variações de umidade e luminosidade.

REFERÊNCIAS

- ALVIM, M. J.; BOTREL, M. de A.; XAVIER, D. F. **As principais espécies de Brachiaria utilizadas no País**. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado de Leite, 2002.
- APSIM. **SoilWat documentation**. APSIM Initiative. Disponível em: <<https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soilwat/>>. Acesso em: 5 fev. 2020.
- ARAÚJO, L. C.; SANTOS, P.M.; RODRIGUEZ, D; *et al.* Simulating Guinea Grass Production: Empirical and Mechanistic Approaches. **Agronomy Journal**, v. 105, n. 1, p. 61–69, 2013.
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 74, p. 430–445, 1959.
- BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C. Soil water availability in a full sun pasture and in a silvopastoral system with eucalyptus. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 2, p. 429–440, 2020.
- BOSI, C; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N. I.; *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, n. March, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102917>>.
- BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; *et al.* CROPGRO-Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 177, n. May 2019, p. 102724, 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308521X1930650X>>.
- BOSI, Cristiam. **Parameterization and evaluation of mechanistic crop models for estimating Urochloa brizantha cv . BRS Piatã productivity under full sun and in silvopastoral system**. University of São Paulo “Luiz de Queiroz ” College of Agriculture, 2017.
- BROWN, H. E.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P.; *et al.* Plant Modelling Framework: Software for building and running crop models on the APSIM platform. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 385–398, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.005>>.

- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Valiação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 96–97, 1997.
- CHIMONYO, V. G. P.; MODI, A. T.; MABHAUDHI, T. Simulating yield and water use of a sorghum – cowpea intercrop using APSIM. **Agricultural Water Management**, v. 177, p. 317–328, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.021>>.
- CRUZ, P. G. da. **Produção de forragem em Brachiaria brizantha: adaptação, geração e avaliação de modelos empíricos e mecanicistas para estimativa do acúmulo de forragem**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2010.
- GARCÍA, A. C. **Estudo de diferentes parâmetros biofísicos de Panicum Maximum cv. Mombaça e Urochloa Brizantha cv. Marandú por radiometria direta e com o novo satélite Sentinel-2**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.
- GAYDON, D. S.; WANG, E.; POULTON, P. L.; *et al.* Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52–75, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.015>>.
- GOMES, F. J.; BOSI, C.; PEDREIRA, B. C.; *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, n. February, p. 102876, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102876>>.
- GUENNI, .; JÁUREGUI, D. Cambios inducidos en la morfoanatomía foliar por efecto de la intensidad lumínica baja, y sus implicaciones en la economía del c, en especies de brachiaria (trin.) Griseb. (Poaceae) y centrosema (dc.) Benth. (Fabaceae). **Ernstia**, v. 25, n. 1, p. 63–88, 2015.
- HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; *et al.* Data requirement for effective calibration of process-based crop models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 234–235, p. 136–148, 2017.
- HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; FAINGES, J.; *et al.* APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. **Environmental Modelling and Software**, v. 103, p. 43–51, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>>.
- HOLZWORTH, D. P.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G.; *et al.* APSIM - Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.
- IBGE. **Censo Agro 2017**. Disponível em: <<https://censoagro2017.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- JING, Q.; JÉGO, G.; BÉLANGER, G.; *et al.* Simulation of water and nitrogen balances in a perennial forage system using the STICS model. **Field Crops Research**, v. 201, p. 10–18, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.017>>.
- JONES, J.W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; *et al.* Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 240–254, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.014>>.
- KALAUGHER, E.; BEUKES, P.; BORNMAN, J. F.; *et al.* Modelling farm-level adaptation of temperate, pasture-based dairy farms to climate change. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 53–68, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.008>>.
- KEATING, B. A.; CARBERRY, P. S.; HAMMER, G. L.; *et al.* An over view of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 267–288, 2003.
- LARA, M. A. S.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; *et al.* Predicting Growth of Panicum maximum: An Adaptation of the CROPGRO–Perennial Forage Model. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 3, p. 600–611, 2012.

- MEDICA, J.A. de S.; REIS, N. S.; SANTOS, M. E. R. Caracterização morfológica em pastos de capim-marandu submetidos a frequências de desfolhação e níveis de adubação. **Ciencia Animal Brasileira**, v. 18, n. 1, p. 25–29, 2017.
- MORENO, L. S. B.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; *et al.* 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.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>>.
- PAULA, C. C. L. de; EUCLIDES, V. P. B.; LEMPP, B.; *et al.* Acúmulo de forragem, características morfogênicas e estruturais do capim-marandu sob alturas de pastejo. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 11, p. 2059–2065, 2012.
- PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; *et al.* Field Crops Research Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, p. 370–379, 2011.
- PEDREIRA, C. G. S.; TONATO, F.; LARA, M. A. S. FORRAGEIRAS *brachiaria*, *panicum* e *cynodon*. In: MONTEIRO, José Eduardo B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. 1. ed. Brasília-DF: INMET, 2009, p. 530.
- PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; *et al.* 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, 2018.
- PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, Carlos 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.. **Agronomic performance and adaptation of the CROPGRO - Perennial Forage Model to predict growth of three tropical forage grasses under irrigated and rainfed conditions**. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2014.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. [s.l.]: Agropecuaria, 2002.
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da; *et al.* An integrated agrometeorological model to simulate Marandu palisade grass productivity. **Field Crops Research**, v. 224, n. 1 July, p. 13–21, 2018.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C.; MENDONÇA, F. C.; SOUZA, D. P.; BRETAS, L. M.; AMORIM, D. M. Calibration of fdr probe in eutroferric red nitisol. In: **V Inovagri Meeting**. Fortaleza: [s.n.], 2019, p. 10.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C. **Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura de *Urochloa brizantha* cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.
- RYMPH, S. J. **Modeling growth and composition of perennial tropical forage grasses**. University of Florida, 2004.
- SANCHES, A. C.. **Coeficiente de cultura (Kc) e correlações de consumo de água, fatores produtivos e biométricos de gramíneas tropicais em cultivo exclusivo e em sobresemeadura com forrageiras de inverno**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2018.

- SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P. de; JESUS, F. L. F.de; *et al.* Crop coefficients of tropical forage crops, single cropped and overseeded with black oat. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 6, p. 448–458, 2019.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília-DF: Embrapa, 2013.
- SANTOS, M. G.; BOOTE, Kenneth J.; FARIA, R. T.; *et al.* Simulation of productivity and soil moisture under Marandu palisade grass using the CSM-CROPGRO-Perennial Forage model. **Crop and Pasture Science**, v. 70, p. 159–168, 2019.
- SILVA, R. de O.; BARIONI, Luis Gustavo; HALL, J. A.Julian; *et al.* Sustainable intensification of Brazilian livestock production through optimized pasture restoration. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 201–211, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2017.02.001>>.
- SOLDEVILLA-MARTINEZ, M.; QUEMADA, M.; LÓPEZ-URREA, R.; *et al.* Soil water balance: Comparing two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations. **Agricultural Water Management**, v. 139, p. 53–63, 2014.
- SOUZA, D. P. de. **Consumo de água, relações hídricas e biométricas em dois sistemas de cultivo irrigado de Urochloa brizantha (Syn . Brachiaria brizantha) cv . Marandu**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2017.
- VALLE, C. B. do; EUCLIDES, V. P. B.; PEREIRA, J. M.; *et al.* **O Capim-Xaraés (Brachiaria brizantha cv. Xaraés) na Diversificação das Pastagens de Braquiária**. 1. ed. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2004.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>>.
- ZHANG, Y.; ZHANG, L.; YANG, N.; *et al.* Optimized sowing time windows mitigate climate risks for oats production under cool semi-arid growing conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 266–267, n. January, p. 184–197, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.019>>.

3. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM-*Oats* PARA SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO DA AVEIA PRETA FORRAGEIRA SOBRE REGIMES DE CORTE

Resumo

Estudos de modelagem de crescimento para culturas anuais são geralmente realizados para culturas de maior interesse econômico, como soja, milho e trigo. Culturas anuais com interesse forrageiro têm sido pouco exploradas pela pesquisa, porém são de grande importância por preencherem uma lacuna de oferta de forragem durante os meses de estacionalidade de culturas forrageiras tropicais e assim oferecem aporte de biomassa para os sistemas em algumas regiões do país. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi parametrizar o modelo APSIM-*Oats* para simular o crescimento da aveia preta (*Avena strigosa*) cultivar IAPAR 61 Ibiporã sob regime de corte. Foram realizados dois experimentos nos anos de 2018 e 2019 em Piracicaba, SP, Brasil (22°42'15"S, 47°37'23" O, alt. 546m) para parametrização do modelo. Os experimentos foram conduzidos em parcelas irrigadas e sem irrigação conduzidos sob regime de corte, sendo analisadas variáveis produtivas, biométricas e a umidade do solo, ao longo dos ciclos. Utilizou-se o modelo Oats da plataforma APSIM, o qual foi calibrado para outras espécies do gênero *Avena*, dentre as quais foi selecionada aquela que tinha características mais semelhantes para iniciar o processo de calibração dos parâmetros. Foram modificados parâmetros dos submodelos de Fenologia, Estrutural e dos órgãos: folhas, raiz, panícula e grãos. A avaliação deu-se pela comparação dos dados observados e simulados por índices estatísticos. O modelo foi capaz de simular as variáveis da aveia preta IAPAR 61 Ibiporã, sendo a biomassa total, viva, massa de folha e colmo, mais eficientemente simuladas apresentando eficiência de modelagem acima de 0,55 no sistema sem irrigação e acima de 0,34 para o sistema irrigado. Na maioria das variáveis o sistema irrigado apresentou menor concordância dos dados simulados com os observados. O conteúdo de água no solo também simulado apresentou resultados melhores para as camadas iniciais do perfil do solo (0 a 0,30 m). A calibração do modelo APSIM-*Oats* para aveia preta resultou em simulações satisfatórias do crescimento da pastagem sob manejo por corte, necessitando de outros estudos em relação ao crescimento da cultura sob sistema irrigado e o potencial de rebrota após corte.

Palavras-chaves: IAPAR 61 Ibiporã, Modelo de cultura, umidade do solo, irrigação, sequeiro, forragem

Abstract

Growth modeling studies for annual crops were generally parameterized for annual economic crops, such as soybeans, corn, and wheat. The research has little-explored about crops with forage interest. However, they are of great importance, filling a forage supply gap during the seasonality season of tropical forage crops, and thus, offer biomass input to systems in some countries. This study aimed to parameterize the APSIM-*Oats* model to simulate the growth of black oats (*Avena strigosa* Schreb.) cultivar IAPAR 61 Ibiporã under a cut-and-carry regime. Two experiments were carried out in 2018 and 2019 in Piracicaba, SP, Brazil (22°42'15' S, 47°37'23" O, 546m) to parameterize the model. The experiments were carried out in irrigated and rainfed plots. Productive, biometric, and soil moisture variables were analyzed throughout the cycles. Using the APSIM-*Oats* model, we calibrated it for other species of the *Avena* genus, selecting the one with the most similar characteristics to start the process of parameter calibration. We modified parameters of Phenology, Structural, and Organ submodels: leaves, roots, panicles, and grains. The evaluation was made by comparing observed and simulated data by statistical indexes. The model was able to simulate the following variables of black oat IAPAR 61 Ibiporã: biomass (total, live, leaves, and stems). It resulted in better simulations than the original, with modeling efficiencies above 0.55 and 0.34 in the rainfed and irrigated systems, respectively. In most variables, the irrigated system showed less agreement between the simulated data and those observed. The soil water content simulated also showed better results for the initial soil layers (0 to 0.30 m). The calibration of the APSIM-*Oats* model for black oats resulted in useful growth simulations under cut-and-carry management, requiring further studies regarding the crop's growth under irrigation and the potential regrowth after cutting.

Keywords: IAPAR 61 Ibiporã, Crop model, Soil moisture, Irrigation, Rainfed, Forage

3.1. Introdução

Em grande parte do território brasileiro, o período estacional de baixo crescimento das forrageiras tropicais está relacionado à época de baixo volume de chuvas, temperaturas mínimas iguais ou abaixo de 11°C, diminuição do fotoperíodo e menor incidência de radiação solar, que proporcionam a diminuição do acúmulo de biomassa de forragem no período de outono/inverno (PEZZOPANE et al., 2012, 2018; SBRISSIA et al., 2017).

Nos locais onde a água é o principal fator limitante à produção, com a introdução da irrigação, há um incremento na produtividade das forrageiras tropicais na época seca. Entretanto, há regiões onde a pastagem pode ter seu crescimento limitado em função de outros elementos climáticos, dentre os quais a temperatura do ar. Por isso, é necessário o uso de técnicas para aumentar a oferta de forragem. Há algumas alternativas para suprir a demanda por alimentação animal, principalmente de bovinos, tais como a suplementação extra e o diferimento de pastagens (reserva de áreas no fim do verão para uso durante outono e inverno), contudo, o diferimento deve ser feito em intervalos de dias específicos, conforme a espécie, para que não ocorram perdas na qualidade nutricional das pastagens (CÂNDIDO et al., 2018).

Outra opção é a utilização de espécies forrageiras adaptadas às condições climáticas de outono e inverno. Essa prática fornece uma boa distribuição da produção de forragem ao longo do ano, porém ainda é necessário um planejamento para maximizar a oferta de alimento e suprir a lacuna produtiva das espécies tropicais com a utilização dessas espécies (SBRISSIA et al., 2017). Essa prática é bastante utilizada na região Sul e em partes das regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, na região dos Pampas Argentinos, no Sul da África, no Sul e Sudeste da Austrália (BARTH NETO et al., 2014; FESSEHAZION et al., 2014; KUNRATH et al., 2014; OJEDA et al., 2018a).

As forrageiras de inverno podem ser implantadas em sistema exclusivo ou em consórcio (permanente ou temporário). O uso de consórcio entre culturas anuais e forrageiras temperadas (permanente) e a sobressemeadura de espécies forrageiras anuais em pastagens perenes (temporário) é adotado para melhorar a produtividade dos sistemas pecuários (OJEDA et al., 2018a). Os mesmos autores afirmam ainda que o estudo dessas espécies é importante frente aos cenários futuros de alteração das condições climáticas, principalmente a temperatura do ar e a distribuição das chuvas. Essas mudanças podem causar alterações na quantidade produzida, bem como no período de estacionalidade de produção das espécies de forrageiras tropicais e de outras culturas de interesse agrícola.

Dentre essas espécies utilizadas no período de inverno, a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) é muito utilizada no Brasil, em cultivo exclusivo ou consorciada. Essa espécie tem pico de produção no início do período estacional e possui alta qualidade nutricional (SBRISSIA et al., 2017). Dependendo do período analisado, a aveia preta apresenta valores de proteína bruta em torno de 8% (pré-secado) a 15% (corte), fibra em detergente neutro de 72% (pré-secado) a 52% (corte) e digestibilidade de 55% (pré-secado) a 79,8 % (corte) (MOREIRA et al., 2017; HORST et al., 2018).

Considerando a complexidade das relações solo-planta-atmosfera nas várias regiões brasileiras, e acrescentando a isso os manejos das culturas de inverno, é necessário o uso de modelos para entendimento amplo de tais sistemas de produção de forragem (JONES et al., 2017), aprofundando o conhecimento sobre o crescimento dessas plantas e suas interações hídricas.

A construção do modelo APSIM-Oats foi realizada por PEAKE et al. (2008), por meio de uma adaptação do modelo de trigo (APSIM-Wheat). Dentre os primeiros trabalhos com simulação de culturas anuais com objetivo forrageiro, Pembleton et al. (2013) avaliaram a acurácia do APSIM na simulação da produtividade do trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia branca (*Avena sativa* L.), colza (*Brassica napus* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e azevém anual (*Lolium*

multiflorum Lam.) na Austrália. Nesse trabalho a cultura do azevém anual foi simulada com o modelo para plantas daninhas (APSIM-Weed), observando uma subestimativa do acúmulo de biomassa para a simulação de azevém anual, colza e sorgo, e uma superestimativa de matéria seca para as culturas de aveia branca e trigo, em todos os casos o coeficiente de determinação (R^2) ficou acima de 0,58.

Ojeda et al. (2018b), utilizando a plataforma APSIM, simularam os rendimentos sequenciais de aveia branca, soja e milho, utilizando os respectivos modelos da plataforma para essas culturas. A precisão do modelo na simulação do rendimento de massa seca sob irrigação foi ligeiramente menor em comparação com as condições de sequeiro para a cultura da aveia branca.

Os resultados obtidos com simulações de plantas a partir de modelos podem sofrer influência da variedade utilizada na parametrização, sendo importante verificar as diferenças de resultados com a mudança da variedade. Mediante as proposições, ressalta-se a importância de estudos de calibração de modelos para forrageiras de inverno. Tais estudos podem contribuir para melhorar os resultados de simulação de desempenho de forrageiras tropicais e hibernais, em cultivo solteiro ou consorciado.

A gama de trabalhos citados anteriormente se refere à aveia branca e não foram encontrados trabalhos com a utilização da aveia preta, demonstrando a necessidade da calibração do modelo APSIM-*Oats* para essa espécie. O objetivo desse estudo foi realizar a parametrização do modelo APSIM-*Oats* para simular o crescimento de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) cultivada para a produção de forragem e manejada por corte.

3.2. Material e Métodos

O estudo foi realizado a partir dos dados de dois experimentos em dois anos consecutivos (2018 e 2019) conduzidos na mesma área experimental na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), em Piracicaba, SP (22° 42' 15"S 47°37' 23" O, alt. 546m). Os ciclos de crescimento foram compreendidos entre os meses de maio e novembro de 2018 (Experimento 1) e entre os meses de maio e outubro de 2019 (Experimento 2).

Em ambos os experimentos foi semeada a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb cv. IAPAR 61 Ibiporã), em linhas, com sementes originais do Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR). Os experimentos foram conduzidos em dois tratamentos: Irrigado e sem irrigação, de área aproximada de 90m² cada, separados por um corredor vegetado com a mesma cultura de 33,7 m². Dentro de cada tratamento, foram separados a área útil dentro das parcelas, dividindo em 4 repetições, as quais possuíam área individual de 9 m² (Figura 1).

Figura 1. Representação esquemática do experimento (esquerda) e fotos do local (direita). Experimentos conduzidos em Piracicaba/SP, durante 2018 (A) e 2019 (B).

Antes da instalação dos experimentos, foram coletadas amostras de solo para análise química, nas profundidades de 0 a 0,40 m, para verificar a necessidade de correção da fertilidade do solo. As análises físicas necessárias à caracterização do solo foram anteriormente realizadas por Prudente Junior, (2019) no Laboratório de Física e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia de Biossistemas (ESALQ/USP), dentre elas a análise granulométrica, a curva característica de retenção de água: capacidade de campo (DUL), ponto de murcha permanente (LL15) e ponto de saturação (SAT), e a densidade volumétrica (BD). A Tabela 1 demonstra os valores discriminados por profundidade do solo.

Tabela 1. Características do solo da área experimental, conduzido em Piracicaba/SP. Composição granulométrica (argila, areia, silte), densidade do solo (BD), solo seco ao ar (Air dry), ponto de murcha permanente (LL15), capacidade de campo (DUL), ponto de saturação (SAT), ponto de murcha permanente para a aveia (OatsLL), coeficiente de extração de água da aveia (OatsKL).

Profundidade m	Argila	Areia %	Silte	BD g cm^{-3}	Air dry	LL15	DUL mm mm^{-1}	SAT	OatsLL	OatsKL d^{-1}
0 - 0,10	46,2	32,2	21,5	1,35	0,15	0,16	0,37	0,46	0,16	0,060
0,10 - 0,20	46,2	32,2	21,5	1,43	0,20	0,22	0,36	0,46	0,22	0,060
0,20 - 0,30	57,4	24,9	17,7	1,46	0,24	0,26	0,37	0,46	0,26	0,060
0,30 - 0,40	57,4	24,9	17,7	1,46	0,30	0,31	0,38	0,46	0,31	0,060
0,40 - 0,50	57,4	24,9	17,7	1,43	0,31	0,31	0,41	0,47	0,31	0,050
0,50 - 0,60	57,4	24,9	17,7	1,38	0,32	0,33	0,41	0,47	0,33	0,025
0,60 - 0,70	56,8	24,4	18,8	1,30	0,31	0,31	0,38	0,47	0,31	0,025
0,70 - 0,80	56,8	24,4	18,8	1,31	0,29	0,31	0,33	0,43	0,31	0,020
0,80 - 0,90	56,8	24,4	18,8	1,39	0,29	0,29	0,32	0,42	0,29	0,020
0,90 - 1,50	54,0	26,1	20,3	1,39	0,29	0,29	0,32	0,42	0,29	0,010

A partir da curva característica de retenção de água no solo, realizada em laboratório, foi necessário ajustar as umidades volumétricas (θ) representativas dos pontos LL15, DUL e SAT na maioria das profundidades. Os dados observados em campo pela sonda FDR, principalmente em relação aos dados de LL15 e DUL apresentaram valores menores que os dados estimados em condições de laboratório. Dessa forma foi necessário ajustar os parâmetros a fim de minimizar o erro, utilizando como balizador a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o ajuste para capacidade de campo foi realizando considerando somente os períodos sem grandes volumes de chuvas e para o ponto de murcha permanente aqueles após maiores intervalos sem chuva. A variável Air dry foi ajustada após o ajuste da LL15, por não ser uma medição padrão nas rotinas de laboratório do Brasil.

Os valores de ponto de murcha permanente para a aveia (OatsLL) foram adotados iguais aos do solo (LL15), para o coeficiente de extração de água da aveia (OatsKL) foi adotado o valor de 0,06 até a profundidade de 0,40 m e após essa profundidade os valores foram ajustados deflacionados por conta de o sistema radicular da cultura da aveia preta ser superficial. O fator de exploração de raízes (OatsXF) foi considerado 1 para todas as profundidades, pelo solo não apresentar nenhum impedimento físico que impossibilite o crescimento das raízes.

Antes da semeadura foi realizada uma nova caracterização química do solo, em cada ano experimental, analisando-se matéria orgânica, carbono orgânico, saturação por bases, soma de bases, macronutrientes, micronutrientes, nitrato – N-NO_3^- e amônio – N-NH_4^+ , para amostras coletadas a cada 0,20 m, até 0,60 m. Foram realizadas também análises de condutividade elétrica e pH (em água) do solo no Laboratório de Física e Qualidade da Água do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP).

A adubação nitrogenada de cobertura foi feita com ureia, logo após o corte em cada ciclo de crescimento, na dose de 50 kg ha^{-1} de N, valor dentro da faixa de 20 a 62 kg ha^{-1} de N utilizados em outros trabalhos (KUNRATH et al., 2014; OJEDA et al., 2016; ZHANG et al., 2019).

Os ciclos de crescimento da aveia foram conduzidos com duração variável, conforme o crescimento da cultura, considerado o objetivo de utilização da forragem. Os cortes foram realizados antes da emissão da panícula, sendo que o primeiro ciclo teve intervalo maior de dias pois esperou-se o estabelecimento e cobertura do solo pela planta.

O manejo da irrigação foi realizado por meio do monitoramento da umidade do solo, com o auxílio de uma sonda capacitiva FDR (Frequency Domain Reflectometry) Diviner® 2000 (SENTEK Pty Ltd., Stepney, SA, Australia), medindo-se a umidade na camada de 0 a 0,70 m, com 4 repetições por tratamento. Adicionalmente, foram instalados tensiômetros na área irrigada, a fim de comparar leituras de umidade com a sonda FDR. Os tensiômetros foram instalados em três profundidades (0,15; 0,30 e 0,60 m), com três repetições.

3.2.1. Experimento 1

O experimento foi semeado no dia 28 de abril de 2018, em linhas espaçadas em 0,20 m com taxa de semeadura de 70 kg ha^{-1} . Em outro trabalho, no qual foram utilizadas diferentes densidades de plantas m^{-2} na semeadura (125 a 341) e espaçamento de 0,175 a 0,2, OJEDA et al. (2018b) observaram menores erros na simulação. A coleta do solo para caracterização química (Tabela 2) foi realizada no dia anterior a semeadura.

Tabela 2. Características químicas iniciais do solo no Experimento 1, realizado em 2018, em Piracicaba/SP. Nitrato (NO_3), amônio (NH_4), pH (água), condutividade elétrica (EC) e conteúdo de carbono orgânico (OC).

Profundidade Unidades m	NO_3 ppm	NH_4 ppm	pH	EC dS m^{-1}	OC %
0 - 0,20	49,00	84,00	5,60	0,38	1,30
0,20 - 0,40	46,00	60,00	5,86	0,32	0,90
0,40 - 0,60	60,00	130,00	6,35	0,34	0,70
0,60 - 0,80	53,00	49,00	6,92	0,35	0,60

A duração do primeiro ciclo foi de 47 dias para a aveia preta, sendo que os demais cinco ciclos tiveram duração entre 30 e 32 dias. No último ciclo foram realizadas avaliações apenas nas parcelas sem irrigação, pois as plantas das parcelas irrigadas não se restabeleceram após o corte anterior (18/10/2018). A duração do primeiro ciclo foi de 47 dias para a aveia preta, sendo que os demais cinco ciclos tiveram duração entre 30 e 32 dias. No último ciclo foram realizadas avaliações apenas nas parcelas sem irrigação, pois as plantas das parcelas irrigadas não se restabeleceram após o corte anterior (18/10/2018).

Para o manejo da irrigação considerou-se a profundidade de 0,50 m e o fator de depleção igual a 30% da capacidade de água disponível por se tratar de condições ótimas ao crescimento da cultura (ALLEN et al., 1998). Os limites de umidade extraídos da curva de retenção da água no solo, realizada em laboratório, foram: capacidade de campo (θ_{cc}) = 44% e ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) = 33%. As lâminas d'água de irrigação foram calculadas para que a umidade retornasse à capacidade de campo. As medições com tensiômetros foram realizadas a cada quatro dias.

Os dados climáticos diários de entrada do modelo são oriundos da estação meteorológica automática da ESALQ/USP, localizada a 100 m da área experimental, e estão apresentados na Tabela 3 juntamente com a irrigação.

Tabela 3. Data do início e final da coleta de dados, radiação solar de entrada média (R_s), temperatura máxima média (T_{max}), temperatura mínima média (T_{min}), velocidade média do vento (u), precipitação acumulada (R) e irrigação acumulada (I), para cada ciclo de crescimento do Experimento 1, realizado dia 28/04 à 18/11/2018 em Piracicaba / SP.

Ciclos	Data (Início - fim)	R_s $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	T_{max} $^{\circ}\text{C}$	T_{min} $^{\circ}\text{C}$	u m s^{-1}	R mm	I mm
1	28/04 a 14/06/2018	13,6	27,7	13,5	1,4	21,8	79,33
2	15/06 a 16/07/2018	13,2	27,8	11,5	1,4	0,0	91,40
3	17/07 a 17/08/2018	13,5	26,4	11,6	1,6	97,5	41,71
4	18/08 a 18/09/2018	17,3	27,9	12,8	1,7	24,1	69,93
5	19/09 a 18/10/2018	17,7	30,0	18,0	1,5	141,2	29,03
6*	19/10 a 18/11/2018	19,6	29,2	17,7	1,9	125,0	--

*somente sistema de sequeiro

O acompanhamento da espécie forrageira foi realizado em 4 avaliações por ciclo de crescimento. Após cada ciclo foram realizados corte, com a altura do resíduo de 0,07 m, essa entre 0,05 e 0,10 m, a qual George et al. (2013) relatam garantir uma boa rebrota e perfilhamento. O material foi cortado na altura do resíduo, no interior de quatro retângulos de amostragem com área individual de 0,25 m². Nessa mesma área foi realizada a contagem de perfilhos. Após o corte, as amostras foram levadas ao laboratório para realizar a separação morfológica, todas as repetições foram separadas em folha, colmo, inflorescência e material morto, e secadas em estufa de circulação

forçada para a determinação da percentagem de matéria seca. Ao final de cada ciclo de crescimento, a área total das parcelas foi rebaixada com roçadeira costal até a altura de resíduo predefinida.

A área foliar específica (AFE) foi determinada nas quatro coletas durante o ciclo, separando 0,05 kg de folhas de cada repetição. A estimativa foi feita com o auxílio de um integrador de área foliar (LI-3100C, Li-Cor®). Essas amostras também foram secas em estufa e pesada após para determinação da área por grama.

A massa do resíduo abaixo dos 0,07 m foi avaliada apenas no final dos ciclos 2, 5 e 6 para a aveia preta, a mesma foi coletada com tesoura de poda e em laboratório foi realizada a separação morfológica e secagem em estufa de circulação de ar até atingir massa constante como na parte acima do solo para determinação de massa seca.

3.2.2. Experimento 2

Entre o período dos dois experimentos, o solo permaneceu em pousio com controle químico de plantas invasoras. Foi realizado uma caracterização inicial do solo com adequação na aplicação de fertilizantes e após isso a caracterização prévia do solo apresentada na Tabela 4. O Experimento 2 foi semeado no dia 27 de abril de 2019, em linhas espaçadas em 0,17 m com taxa de semeadura de 100 kg ha⁻¹.

Tabela 4. Características químicas iniciais do solo no Experimento 1, realizado em 2019, em Piracicaba / SP. Nitrato (NO₃), amônio (NH₄), pH (água), condutividade elétrica (EC) e conteúdo de carbono orgânico (OC).

Profundidade m	NO ₃ ppm	NH ₄ ppm	pH	EC dS m ⁻¹	OC %
0 - 0,20	53,00	25,00	7,25	0,39	1,30
0,20 - 0,40	21,00	46,00	7,21	0,25	1,00
0,40 - 0,60	60,00	46,00	6,78	0,44	0,70
0,60 - 0,80	60,00	46,00	6,78	0,44	0,70

O manejo da irrigação do experimento 2 foi a mesma realizada no Experimento 1. A duração do primeiro ciclo foi de 47 dias para a aveia preta, sendo que os demais ciclos (4) tiveram duração entre 30 e 36 dias. O último ciclo (5) foi acompanhado apenas nas parcelas sem irrigação, pois as plantas das parcelas irrigadas não se restabeleceram após o corte anterior (24/09/2019). Após o último ciclo da parcela sem irrigação, os perfilhos ainda permaneceram vivos por aproximadamente 8 dias (01/11/2019).

Para o Experimento 2, também foram considerados os dados da estação meteorológica automática da ESALQ/USP, apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Data do início e final da coleta de dados, radiação solar média (Rs), temperatura máxima média (Tmax), temperatura mínima média (Tmin), velocidade média do vento (u), precipitação acumulada (R) e irrigação acumulada (I), para cada ciclo de crescimento do Experimento 2, realizado dia 27/04 à 01/11/2019 em Piracicaba/SP.

Ciclos	Data (Início - final)	Rs MJ m ⁻² d ⁻¹	Tmax °C	Tmin °C	u m s ⁻¹	R mm	I mm
1	27/04 a 13/06/2019	13,6	27,2	14,6	1,3	42,4	114,36
2	14/06 a 18/07/2019	13,7	26,4	11,2	1,5	52,0	91,67
3	19/07 a 19/08/2019	15,7	27,6	11,4	1,7	2,4	122,51
4	20/08 a 24/09/2019	18,0	30,3	15,0	1,9	39,5	129,50
5*	25/09 a 24/10/2019	21,1	31,7	16,7	1,9	50,5	62,57
6*	25/10 a 01/11/2019	25,8	35,2	18,8	1,9	81,8	--

*somente sistema de sequeiro

O experimento conduzido no ano de 2019 foi realizado seguindo o mesmo protocolo de avaliação do experimento de 2018, com a diferença de que apenas no primeiro ciclo foram realizadas quatro avaliações e nos demais apenas ao final do ciclo. A quantificação da massa de resíduo foi realizada no final de cada ciclo, a partir do segundo, tanto para as parcelas em sequeiro quanto para as irrigadas.

3.2.3. Descrição do modelo APSIM-Oats

A calibração foi realizada para o modelo APSIM-Oats (PEAKE et al., 2008) da versão APSIM Next Generation (HOLZWORTH et al., 2018), o qual foi desenvolvido a partir do modelo da cultura do trigo e atualizado para a versão mais recente (BROWN et al., 2014).

O modelo APSIM-Oats possui a estrutura básica padrão do Plant Modelling Framework (PMF) desenvolvido por Brown et al. (2014). Essa estrutura permite o acoplamento de modelos e submodelos em estrutura de árvore com ramos-filhos para a construção da simulação, no caso da aveia, os submodelos são os seguintes: Arbitração (Biomassa e Nitrogênio estruturais, metabólicos e de reserva), Fenologia, Estrutural e os relacionados aos órgãos da planta (Grão, Folha, Colmo, Raiz e Panícula).

A fenologia do modelo APSIM-Oats é alterada conforme o efeito da temperatura, relacionada ao conceito chamado de tempo termal, sendo que a mudança entre as fases é conduzida a partir da soma térmica característica de cada fase. Além disso, influenciada pela taxa de aparecimento de folhas, a qual é calculada a partir do número de folhas e de fatores que definem o nível de sensibilidade da cultivar à vernalização e ao fotoperíodo, durante a fase vegetativa e o começo da fase reprodutiva (JAMIESON et al., 1995).

O desenvolvimento desde a semeadura até a maturidade é dividido em oito fases marcadas com etapas fenológicas: germinação, emergência, fim do estágio juvenil, iniciação floral, floração, início do enchimento de grãos, fim do enchimento de grãos e maturidade fisiológica (ZHANG et al., 2019; PEAKE et al., 2020), cada uma destas se inicia e termina em uma subfase específica como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Fases fenológicas e estágio inicial e final para o modelo APSIM-Oats.

Número	Nome da fase	Estádio Inicial	Estádio Final
1	Germinativa	Semeadura	Germinação
2	Emergente	Germinação	Emergência
3	Vegetativa	Emergência	Espiguetas terminal
4	Alongamento do Colmo	Espiguetas terminal	Folha bandeira
5	Reprodutiva precoce	Folha bandeira	Florescimento
6	Desenvolvimento do grão	Florescimento	Início do enchimento do grão
7	Enchimento do grão	Início do enchimento do grão	Fim do enchimento do grão
8	Maturação	Fim do enchimento do grão	Maturidade
9	Amadurecimento	Maturidade	Maturidade de colheita
10	Pronto para colheita	Maturidade de colheita	-

O submodelo estrutural simula o desenvolvimento da planta a partir da densidade de semeadura, utilizando as informações de aparecimento de folhas, calculada a partir do modelo de estádios fenológicos de Haun (HAUN, 1973), para o cálculo da quantidade de folhas em desenvolvimento, e os valores da taxa de perfilhamento para o cálculo da quantidade de colmos atual, até a formação da espiguetas terminal. Os principais componentes do submodelo estrutural são apresentados no infográfico da Figura 2.

Figura 2. Principais componentes do submodelo Estrutural do APSIM-Oats.

Folha	Colmo	Panícula	Grão	Raiz
<ul style="list-style-type: none"> • Área foliar • Demanda e oferta de matéria seca • Demanda e oferta de nitrogênio • Fotossíntese • Condutância estomática • Padrão de renovação de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda e oferta de matéria seca • Demanda e oferta de nitrogênio • Taxa de senescência • Padrão de renovação de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda e oferta de matéria seca • Demanda e oferta de nitrogênio • Senescência e queda • Padrão de renovação de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Função de número • Tamanho potencial • Demanda por matéria seca • Concentração de nitrogênio • Graus-dia acumulado • Padrão de renovação de biomassa 	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento da raiz • Demanda por matéria seca • Demanda por nitrogênio • Absorção de água e nitrogênio • Padrão de renovação de biomassa

Figura 3. Componente principais dos submodelos de órgãos da planta do modelo APSIM-Oats.

3.2.4. Parametrização do modelo

A partir dos dados dos dois experimentos conduzidos em anos diferentes (2018 e 2019) foi possível parametrizar e avaliar o modelo APSIM-Oats para estimar o crescimento da aveia preta cv. IAPAR 61 Ibiporã. A parametrização foi realizada com os dados das parcelas Irrigadas (condição ótima) dos dois Experimentos e após isso testadas as respostas em condições com restrição hídrica.

Inicialmente foi realizado um estudo preliminar das cultivares calibradas anteriormente por outros autores, disponíveis no modelo Oats, a fim de verificar quais cultivares tinham utilização como forrageira e possuíam a capacidade de rebrotação após corte, por meio da busca de informações em catálogos de cultivar. Após identificar algumas com potencial de utilização, foi realizada uma prévia simulação sem alteração de nenhum parâmetro, e a cultivar que apresentou respostas mais semelhantes à aveia preta foi a *Avena byzantina* cv. Algerian.

Dessa maneira foi possível visualizar quais os parâmetros influenciam mais na simulação da aveia com o objetivo de produção de biomassa por ciclos. Foram calibrados os parâmetros pelo método de tentativa e erro, dentro dos modelos de Fenologia, Estrutural, e dos órgãos: Folha, Panícula, Grão e Raiz.

Esse estudo também avaliou os parâmetros correspondente ao modelo APSIM-SoilWat a fim de analisar se apresentavam boas respostas quando utilizados para as situações do estudo. O SoilWat é um modelo de balanço hídrico em cascata o qual foi criado a partir do CERES (JONES; KINIRY, 1986) e PERFECT (LITTLEBOY et al., 1992).

3.2.5. Índices de avaliação

A avaliação do desempenho dos modelos, valores estimados versus observados, foi realizada com o auxílio de alguns coeficientes, erros e índices. Para comparação foram utilizados os seguintes coeficientes: coeficiente de determinação (R^2) da análise de regressão, e coeficiente de eficiência da modelagem (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970). Para a análise de erros serão considerados: erro médio (ME); erro absoluto médio (MAE) e a raiz quadrada do

erro médio (RMSE). Os índices de utilizados serão: índice de concordância (d) de Willmott (WILLMOTT et al., 1985) e de confiança (c) de Camargo; Sentelhas (1997). As equações estão apresentadas de 1 a 6.

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

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (2)$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |(E_i - O_i)| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2\right]} \quad (4)$$

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

$$c = \sqrt{R^2} \times d \quad (6)$$

3.3. Resultados

3.3.1. Parâmetros ajustados

O primeiro valor de parâmetro modificado foi dentro do modelo estrutural, relacionado à taxa de perfilhamento durante as fases vegetativas, o qual é contabilizado através do aparecimento de folhas. Com os dados de contagem de perfilhos dos experimentos foi possível verificar que os valores observados em campo eram menores que o padrão resposta dado pelo modelo padrão, dessa forma os valores foram ajustados conforme na Tabela 7.

No submodelo de fenologia foi modificado o número mínimo de folhas. No modelo padrão do APSIM-*Oats*, o valor é de 7 folhas, para a cultivar Algerian, esse parâmetro tem valor de 9 folhas, sendo este último adotado para a aveia preta cultivar IAPAR 61 Ibiporã (Tabela 7).

Além desses, foram modificados outros dois parâmetros no módulo de fenologia, o primeiro relacionado à sensibilidade à vernalização (Vrn Sensibilidade) e o segundo relacionado a resposta da vernalização quanto ao tempo para mudança entre as fases vegetativa a reprodutiva (Vrn Lag), esse valor pode variar de 0 a 2. Para a cultura da aveia preta, o início da fase reprodutiva foi mais tardio, por isso o valor foi alterado de 1 para 2, ou seja, um atraso 2 vezes maior na fase 3 Vegetativa (Tabela 7). Esse atraso fez com que a data de início da diferenciação da espiguetta terminal ou fase 4 (Tabela 6) fosse de 21 dias para o Experimento 1 e de 16 dias para o Experimento 2.

No mesmo módulo de fenologia foram alterados os parâmetros de sensibilidade ao fotoperíodo (Pp Sensibilidade) e a sensibilidade ao fotoperíodo na fase reprodutiva. Pp Sensibilidade para o modelo padrão possui o valor de 3 folhas e para a cultura da aveia preta foi considerado o mesmo valor adotado para a cultivar Algerian, igual

a 6 folhas. Na fase reprodutiva o valor adotado foi de 2 folhas, o valor da cultivar Algerian é de 4 folhas e do modelo padrão de 3 folhas (Tabela 7).

Também se modificou o efeito da cobertura da cultura sobre o solo na taxa de perfilhamento, os valores adotados foram os mesmos da cultivar Algerian (Tabela 7), o valor potencial de perfilhamento diminui após a cobertura de 10% até 50%.

Os parâmetros alterados no modelo de fenologia e estrutural estão apresentados na Tabela 7, ambos estão comparados com os dados calibrados da cultivar Algerian e os dados originais do modelo Oats, os demais parâmetros não foram alterados.

Tabela 7. Parâmetros e estrutura dos submodelos do APSIM-Oats, calibrado para aveia preta IAPAR 61 Ibiporã, avaliado entre 2018 e 2019 em Piracicaba/SP, e os valores originais calibrados para aveia amarela Algerian. Os parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus valores de fator correspondentes (y). Vrn: vernalização, Pp: fotoperíodo.

Parâmetro	Unidades	Algerian	IAPAR 61 Ibiporã
Número mínimo de folhas.	Folhas	9	9
Vrn Sensibilidade	Folhas	12	13
Vrn Lag	-	1	2
Pp Sensibilidade	Folhas	6	6
Pp Sensibilidade Pp na fase Reprodutiva inicial	Folhas	4	2
Taxa de perfilhamento potencial Fase Vegetativa	X: Folha Expandida	X: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8	X: 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8
	Y: Taxa de Perfilhamento	Y: 0; 0; 1; 2; 4; 7; 12; 20	Y: 0; 0; 0,8; 0,5; 0,5; 0,2; 0; 0
Efeito da cobertura na taxa de perfilhamento	X: Fração de cobertura	X: 0; 0,4; 0,7	X: 0; 0,4; 0,7
	Y: Valor da idade	Y: 1; 1; 0	Y: 1; 1; 0

Foram calibrados alguns parâmetros dos órgãos, os quais estão apresentados na Tabela 8, não sendo alterado nenhum parâmetro para o submodelo colmo. Os demais são iguais aos das tabelas originais de cada órgão, disponíveis nos Anexos A ao E.

A partir dos dados experimentais foram observadas algumas características morfológicas diferentes nas plantas de aveia preta. A primeira dessas, foi na área máxima da folha, para a qual foi adotado o mesmo valor calibrado para a cultivar Algerian, igual a 5000 mm² (Tabela 8). Foram observadas diferenças na área foliar específica (SLA) para a cultura da aveia preta, sendo assim, os valores foram alterados conforme as fases fenológicas (Tabela 8).

Outra característica diferente observada, foi a SLA mínima em relação ao conteúdo de nitrogênio na folha, menor em relação à cultivar Algerian, dessa forma foi modificado para 6000 mm² g⁻¹ ou 60 cm² g⁻¹, independentemente da quantidade de nitrogênio encontrada na folha. A última modificação no modelo da folha foi no fator de duração do crescimento da folha, esse sendo alterado de 1,75 para 4 (Tabela 8).

Foram modificados também, o peso máximo da panícula, a partir das informações experimentais. E o tamanho máximo do grão foi modificado segundo o catálogo de descrição das características da cultivar IAPAR 61 Ibiporã (IAPAR, 2000).

No submodelo da raiz, a contabilização da demanda de matéria seca estrutural é dividida em três fases: pré-emergência, pré-florescimento e pós-florescimento. A fase de pré-florescimento tem como fatores a idade e o

estádio fenológico, no modelo inicial o valor diminuía entre o estágio 3 a 4. Verificando-se que a cultivar IAPAR 61 Ibioporã apresenta florescimento tardio, adotou-se o mesmo valor para ambas as fases (Tabela 8).

Tabela 8. Parâmetros dos submodelos dos órgãos da planta (folha, panícula, grão e raiz) do APSIM-Oats, calibrados para a aveia preta IAPAR 61 Ibioporã e os valores originais da calibração para aveia amarela (Algerian). Para cada parâmetro é mostrado o alcance das variáveis (x) e seu correspondente valor de fator (y). SLA: área foliar específica.

Parâmetros	Unidade	Algerian	IAPAR 61 Ibioporã
Área Foliar	mm ²	5000	5000
SLA Máxima	X: Estádio fenológico Y: SLA mm ² g ⁻¹	X: 2; 3; 4 Y: 25000; 30000; 40000	X: 2; 3,05; 3,1; 4; 6; 7; 8 Y: 100; 3200; 45000; 25000; 12000; 8000; 6000
SLA Mínima	X: Folha Fn Y: SLA mm ² g ⁻¹	X: 0,4; 1 Y: 10000; 18000	X: 0,4; 1 Y: 6000; 6000
Multiplicador de duração do crescimento da folha	-	1,75	4
Peso máximo da panícula	g	0,4	0,17
Tamanho máximo do grão	g	0,032	0,015
Fator de idade no pré-florescimento sobre a demanda de DM para raiz	X: estágio fenológico Y: Fração (0-1)	X: 3; 4 Y: 0,5; 0,2	X: 3; 4 Y: 0,2; 0,2

No modelo SoilWat foi necessário alterar os coeficientes relacionados a evaporação a água no solo (U) e coeficiente de drenagem (ConA), utilizados para calcular a evaporação do solo em dois estádios, no primeiro o solo está completo com água e a evaporação do solo é pelo menos igual à taxa potencial de evaporação. Ao longo do tempo, enquanto o conteúdo de água do solo diminui, a evaporação do solo será menor que a evaporação potencial (chamada de segundo estágio) (APSIM, 2020). Os coeficientes, U e ConA da simulação padrão para o modelo Oats apresentavam valores de 5 não variando conforme a época do ano (verão e inverno).

No presente estudo, como as parcelas da aveia preta foram semeadas em linhas, não permaneciam sombreadas a todo momento, então, foi necessário ajustar os valores de U para 4 mm (verão) e 2 mm (inverno) e ConA para 2 (verão) e 1.5 (inverno) como apresentado na Tabela 9. A constante da difusividade da água no solo e o gradiente de difusividade foram mantidos conforme os valores padrão para solos argilosos (54.6% em média de argila, Tabela 1): 40 mm² day⁻¹ e 16 mm⁻¹ respectivamente (DALGLIESH et al., 2016).

Tabela 9. Parâmetros do modelo APSIM-SoilWat e seus valores padrão e ajustados para o Nitossolo no Experimento 1.

Descrição	Valor Padrão	Valor Ajustado
Data de início no verão para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	1-Out	1-Out
Acumulado de evaporação de água no solo ao chegar ao final do estágio 1 de evaporação no verão (a.k.a. U) (mm)	5	4
Coefficiente de drenagem para o estágio 2 da evaporação da água no solo no verão (a.k.a. ConA)	5	2
Data de início no inverno para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	1-Abr	1-Abr
Acumulado de evaporação de água no solo ao chegar ao final do estágio 1 de evaporação no inverno (a.k.a. U). (mm)	5	2
Data de início no verão para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	5	1.5

3.3.2. Variáveis da Planta

A simulação de massa de material vivo e massa de folha, mostraram estimativas mais precisas (R^2) no sistema sem irrigação. Quando se analisa a exatidão (índice 'd'), esta apresentou-se maior para quase todas as variáveis no sistema sequeiro, com exceção do índice de área foliar (LAI) e da área foliar específica (SLA), como observado na Tabela 10.

Tabela 10. Valores dos coeficientes e erros estatísticos para a comparação entre valores observados (O) e estimados (E) das variáveis da aveia preta IAPAR 61 Ibiporã pelo APSIM-Oats, para os Experimentos 1 e 2, realizados entre 2018 e 2019 em Piracicaba/SP. Média da série de dados O e E; índice de concordância (d), coeficiente de determinação (R^2), índice de confiança (c), erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (RMSE) e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

Variáveis	Data	Média O	Média E	d	R^2	c	ME	MAE	RMSE	NSE
Unidades		$g\ m^{-2}$ ou $cm^2\ g^{-1}$		--	--	--	$g\ m^{-2}$ ou $cm^2\ g^{-1}$ (SLA)			--
Massa total ($g\ m^{-2}$)	Sequeiro	129,10	130,15	0,95	0,81	0,85	1,11	26,55	36,06	0,77
	Irrigado	181,64	98,03	0,80	0,82	0,73	-83,58	83,71	103,40	0,34
Massa viva ($g\ m^{-2}$)	Sequeiro	102,22	118,35	0,93	0,81	0,83	14,20	26,52	38,98	0,65
	Irrigado	155,73	94,37	0,83	0,74	0,71	-61,34	63,45	86,19	0,44
Massa de Folha ($g\ m^{-2}$)	Sequeiro	50,47	59,41	0,91	0,79	0,81	8,63	16,52	25,02	0,55
	Irrigado	83,58	51,14	0,81	0,62	0,64	-32,42	39,54	52,24	0,39
Massa de Colmo ($g\ m^{-2}$)	Sequeiro	50,94	56,86	0,91	0,73	0,78	4,51	14,49	20,09	0,62
	Irrigado	72,03	42,83	0,82	0,78	0,73	-29,20	29,20	39,66	0,43
Índice de área foliar ($m^2\ m^{-2}$)	Sequeiro	0,67	1,35	0,71	0,66	0,57	0,60	0,60	0,97	-1,72
	Irrigado	1,44	1,37	0,80	0,44	0,53	-0,07	0,74	1,15	0,31
Área foliar específica ($cm^2\ g^{-1}$)	Sequeiro	18644,79	21269,02	0,81	0,48	0,56	16,39	56,10	67,99	0,43
	Irrigado	27530,04	24899,01	0,78	0,52	0,56	-26,27	83,46	101,21	0,47
Massa de material morto ($g\ m^{-2}$)	Sequeiro	26,88	11,80	0,54	0,14	0,20	-13,09	16,60	23,44	-0,45
	Irrigado	25,91	3,67	0,49	0,56	0,36	-22,24	22,24	30,80	-0,63
População de perfilhos (unidades)	Sequeiro	416,20	299,83	0,67	0,54	0,49	-119,42	145,88	177,93	0,05
	Irrigado	480,08	319,15	0,54	0,17	0,23	-143,62	144,71	180,16	-1,34

Para o sistema sem irrigação o índice 'd' variou de 0,54 a 0,95, o coeficiente R^2 de 0,14 a 0,81 e o índice 'c' de 0,20 a 0,85, classificado como 'péssimo' a 'muito bom', respectivamente, segundo Camargo & Sentelhas (1997), e com NSE igual ou menor a 0,77 (Tabela 10). As piores simulações deram-se para a estimativa do LAI, da massa de material morto e da população de perfilhos (Tabela 10).

Para o sistema irrigado, o modelo APSIM-Oats não foi eficiente em prever o potencial produtivo de biomassa viva observada em campo nos dois experimentos para os dois anos, com erro médio de $-613,4 \text{ kg ha}^{-1}$ e com RMSE de $861,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tabela 10). Os índices estatísticos demonstraram estimativas menos aderidas aos dados observados, com valores de índice 'd' variando de 0,49 a 0,83, R^2 de 0,17 a 0,82 e índice 'c' de 0,23 a 0,73, classificado de 'péssimo' a 'muito bom', respectivamente, segundo Camargo & Sentelhas (1997), com NSE menor que 0,47 (Tabela 10). Da mesma forma que no sequeiro, as piores simulações foram para as estimativas de LAI e população de perfilhos.

De maneira geral observou-se que a parametrização do modelo não foi capaz de alcançar o potencial produtivo em biomassa viva, observado em campo para a cultura sob irrigação, nos dois primeiros ciclos (Figura 8), fazendo com que o RMSE alcançasse o valor de $861,9 \text{ kg ha}^{-1}$ no sistema irrigado enquanto no sistema sequeiro de $389,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (Tabela 10).

Figura 4. Série de dados observados e estimados da Massa seca de Matéria Viva para aveia preta em sistema Irrigado e Sequeiro nos experimentos 1 e 2, conduzidos em 2018 e 2019 respectivamente Piracicaba/SP.

Os maiores erros para a estimativa de LAI foram apresentados nos dois primeiros ciclos no Experimento 1 e, no Experimento 2, no 3º e 4º ciclos de cultivo. Em ambos os experimentos, o modelo não foi capaz de alcançar os valores máximos observados de LAI (Figura 5) gerando um RMSE de 0,97 no sistema sequeiro e 1,15 no Irrigado. Observando a estimativa de material morto, os erros na simulação em ambos os anos ocorreram ao longo de todo o ciclo, com maior discrepância entre os dados observados e estimados no final do ciclo (Figura 6), essa variável gerou valores de RMSE de 23,44 e de $30,80 \text{ g m}^{-2}$ no sequeiro e no irrigado, respectivamente.

Figura 5. Série de dados observados e estimados do Índice de Área foliar para a aveia preta em sistema Irrigado e Sequeiro nos experimentos 1 (a) e 2 (b), conduzidos em 2018 e 2019, respectivamente, em Piracicaba/SP.

Figura 6. Série de dados observados e estimados da massa de matéria morta da aveia preta para os tratamentos irrigado e sequeiro nos experimentos 1 (a) e 2 (b), conduzidos em 2018 e 2019, respectivamente, em Piracicaba/SP.

A estimativa da população de perfilhos apresentou subestimativa, com erro médio de 120 perfilhos para o sistema sequeiro e de 144 unidades para o sistema irrigado (Tabela 10).

As variáveis que apresentaram melhores estimativas foram massa total, massa de material vivo, massa de folhas e massa de colmo. A análise de erros demonstrou maiores erros para o sistema irrigado em relação ao sequeiro, com subestimativa para o sistema irrigado (erro médio negativo). No sistema irrigado, as estimativas apresentaram índice NSE entre 0,34 e 0,44 (Tabela 10). Nos gráficos de correlação entre os dados observados e os estimados, apresentados na Figura 7, percebe-se a maior inclinação de reta em relação a reta 1:1 para o sistema irrigado, com dados mais discrepantes.

Figura 7. Correlações entre os dados observados e estimados da aveia preta IAPAR 61 Ibiporã para os tratamentos irrigado e sequeiro, nos experimentos 1 (a) e 2(b), conduzidos em 2018 e 2019, respectivamente, em Piracicaba/SP. (A) Massa de folha, (B) Massa de colmo.

Os valores observados de massa de inflorescência (panícula + grãos) foram baixos e ocorreram apenas no final dos últimos ciclos de crescimento, uma vez que o objetivo do cultivo foi a produção de biomassa vegetal e o corte deu-se a fim de aproveitar a máxima biomassa verde presente. Assim não houve dados suficientes para realizar uma correlação entre os dados observados e os estimados, impossibilitando uma calibração adequada para essa variável. Apenas é possível afirmar que o início do período de formação de panícula (07 de outubro de 2018) observado no Experimento 1 coincidiu com o estimado pelo modelo, entretanto, para o Experimento 2, o início do florescimento observado a campo (23 de setembro de 2019) ocorreu antes da data prevista pelo modelo.

Porém ambos os períodos estão dentro do intervalo de alongamento de colmo na escala Zadock de 30 a 39 (ZADOKS; CHANG; KONZAK, 1974). A escala Zadock representa estádios de crescimento para espécies de cereais e é utilizado também no modelo APSIM-Oats, o valor de estádio de crescimento Zadok é calculado com base no estádio de crescimento fenológico atual dentro do modelo. O modelo usa informações sobre germinação, emergência, aparecimento de folhas e aparecimento de perfilhos para os estádios iniciais de crescimento (0 a 30) e para os estádios reprodutivos baseiam-se nos estádios fenológicos iniciado pelo alongamento de colmo, pelos estádios no final da fase 3 (Tabela6), representado na escala Zadok pelo valor 30 até a maturação (100) do Zadok.

3.3.3. Conteúdo de água no solo

Foram estudadas as simulações de conteúdo de água no solo para cada camada de solo de 0,10 m, considerando o perfil de 0 a 0,70 m. As estimativas pelo modelo SoilWater para o sistema irrigado em comparação com os dados coletados pelos sensores capacitivos no solo, não apresentam boas correlações quando analisados por camada, especialmente nas camadas mais profundas.

A análise por profundidade apresentou índice 'd' de Willmott entre 0,84 e 0,96, R^2 de 0,61 a 0,86, índice NSE de 0,08 a 0,84 e RMSE entre 0,95 e 3,27 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ (Tabela 11). Também foi constatado que nas camadas mais superficiais do solo (0 a 0,40 m), a simulação foi mais eficiente em relação às camadas de 0,40 a 0,70 m (Tabela 11).

Porém, quando avaliados em conjunto, ou seja, considerando-se para a análise estatística o conjunto dos dados do sistema irrigado com o sequeiro, os índices estatísticos estudados para avaliação apresentaram melhores resultados. Na somatória das camadas, foi observado índices na faixa de 0 a 0,30 m com coeficiente R^2 com valores de 0,89, e coeficiente de NSE igual a 0,88 (Tabela 11). A camada de 0 a 0,70 m apresentou valores de R^2 de 0,91 e NSE igual a 0,89, porém com erro RMSE de 6,98 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Tabela 11. Resultado estatístico, coeficientes e erros estatísticos para comparação entre valores observados (O) de umidade do solo e estimados (E) pelo modelo APSIM-*SoilWat*, para os Experimentos 1 e 2, realizados entre 2018 e 2019, em Piracicaba/SP. Média da série dos dados O e E. Índice de concordância (d), coeficiente de determinação (R^2), índice de confiança (c), erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (RMSE) e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

Profundidade	Média O	Média E	d	R^2	c	ME	MAE	RMSE	NSE
0 - 0,10 m	30,19	30,41	0,93	0,75	0,80	0,20	2,48	3,27	0,74
0,10 - 0,20 m	31,69	32,30	0,96	0,86	0,89	0,61	1,44	1,88	0,84
0,20 - 0,30 m	32,83	33,58	0,93	0,80	0,83	0,73	1,44	1,86	0,73
0,30 - 0,40 m	34,93	35,10	0,92	0,71	0,78	0,15	0,95	1,25	0,68
0,40 - 0,50 m	34,99	35,88	0,86	0,61	0,67	0,88	1,19	1,75	0,43
0,50 - 0,60 m	39,51	38,80	0,84	0,65	0,68	-0,71	1,27	1,79	0,08
0,60 - 0,70 m	36,14	36,48	0,90	0,70	0,75	0,34	0,73	0,95	0,62
0 - 0,30 m	94,63	96,29	0,97	0,89	0,91	1,54	3,76	4,97	0,88
0 - 0,70 m	239,99	242,55	0,97	0,91	0,93	2,33	5,64	6,98	0,89

Observando a série de dados observados e estimados do conteúdo de água no solo no sistema Sequeiro, em linha temporal e separados nas camadas de 0 a 0,30 m e 0,40 a 0,70 m (Figura 8). É possível visualizar (eventos destacadas em vermelho na Figura 8), na camada de 0,30 a 0,70 m a entrada de água não foi igual o a simulado pelo modelo, a infiltração predita foi maior do que observada em profundidade em eventos com precipitação diária acima de 38 mm em período diário.

Figura 8. Série de dados observados (Obs) e estimados (Est) pelo modelo APSIM-*SoilWat* do conteúdo de água no solo, na camada de 0 a 0,30 m e 0,40 a 0,70 m sob cultivo de aveia preta em sistema Sequeiro nos experimentos 1 e 2, conduzidos em 2018 e 2019 respectivamente Piracicaba/SP. Em vermelho, destaca-se, eventos de entrada de precipitação.

Foi observado que o comportamento do conteúdo de água no solo ao longo do período (Figura 9), apresentou maiores erros de estimativa a partir de 04 de agosto de 2018, (Experimento 1) no experimento em

sequeiro, data na qual houve uma precipitação pluvial de aproximadamente 59 mm. Anteriormente a esse evento, a área passou por um período de 121 dias com apenas 10 dias de registro de chuva diária com máxima de 7,9 mm. Pelo solo da área em sequeiro estar com a umidade baixa, parte do volume precipitado foi perdido e não infiltrou integralmente no solo, dessa forma a simulação de balanço hídrico não foi eficiente em prever as perdas por escoamento superficial e evapotranspiração. O modelo SoilWat, por trabalhar com contabilização das entradas com tempo diário, não considera a distribuição temporal ao longo do dia desse volume.

A partir dessa data (4/08/2018), as estimativas do sequeiro foram prejudicadas, o que acarretou aumento dos erros comparando os dados de umidade do solo com os dados simulados. Na Figura 9, observa-se que os valores observados ficaram abaixo dos valores simulados após esse período.

Figura 9. Série de dado do conteúdo de água no solo observados e estimados pelo modelo APSIM na camada de 0 a 0,70 m, para os Experimentos 1 e 2 irrigado e em sequeiro, conduzidos entre 2018 e 2019, em Piracicaba/SP.

3.4. Discussão

A respostas da comparação entre os dados observados e estimados por meio da calibração do modelo APSIM-Oats para a cultura da aveia preta IAPAR 61 Ibiporã, sob regime de corte e em sistemas irrigado e sem irrigação, demonstraram resultados mais precisos e exatos para as variáveis de massa total, massa viva, massa de folha e população de perfilhos no sistema sem irrigação, o qual também apresentou maior eficiência de modelagem, com exceção para a população e perfilhos (Tabela 10).

As variáveis massa de colmo, índice de área foliar (LAI), área foliar específica e massa de material morto apresentaram divergências quando aos resultados serem mais precisos ou exatos, em um ou outro sistema. A massa de colmo e a massa de material morto apresentou maior exatidão para o sistema em sequeiro, porém maior precisão sob irrigação (Tabela 10).

O aumento da temperatura pode acelerar o desenvolvimento das plantas, reduzindo o acúmulo de fotoassimilados e o enchimento de grãos (LIU et al., 2013) e prejudicando o desenvolvimento das espécies, com intuito de produção de grãos e sementes em cultivos durante o inverno. Porém, para espécies mais apropriadas para rendimento de biomassa, como o caso da aveia preta, o aumento da temperatura ou cultivo em locais com inverno

ameno, como no caso desse experimento em Piracicaba/SP, pode ser benéfico em termos de rendimento de biomassa.

Em outro experimento conduzido em Piracicaba/SP conduzido por Tonato et al. (2014) com aveia preta comum foi monitorado o rendimento de biomassa durante três ciclos, sendo que os dois primeiros não diferiram estatisticamente entre si (1907 a 2000 kg ha⁻¹), sendo que a soma da biomassa produzida nesses dois ciclos correspondeu a 77% de toda a produção do ciclo da cultura, e no terceiro ciclo a produtividade foi menor, com aproximadamente 1200 kg ha⁻¹. No presente estudo, foi possível obter quatro ciclos de rebrota no sistema irrigado para os dois experimentos, sendo que no Experimento 1 (2018) os dois primeiros ciclos foram os mais produtivos e no Experimento 2 (2019), as maiores produções foram observadas nos ciclos 2 e 3.

A sequência de cortes adotada para a cultura da aveia preta exerceu influência nas mudanças entre as fases fenológicas da cultura e na rebrotação dos perfilhos. O modelo APSIM-Oats utiliza o tempo termal ou mais conhecido como graus dias para mudança entre as fases fenológicas (PEAKE et al., 2020). Com a interrupção desse tempo com o corte, houve indução controlada da cultura a retornar a fases anteriores e ou permanecer na mesma alocando suas reservas para nova formação de folhas e colmos.

Deen et al. (2003) testaram quatro modelos (ALMANAC, INTERCOM, CROPSIM e APSIM) em relação à simulação do LAI e da biomassa para a cultura do trigo e do azevém (*Lolium rigidum*) em sistemas irrigado e sem irrigação, o sistema irrigado apresentou maior discrepância na média entre as simulações dos modelos em relação ao sistema sequeiro, para biomassa e LAI. A partir de 250 dias, para o azevém, a diferença entre os modelos foi mais acentuada para a estimativa de biomassa. Ojeda et al. (2018b) avaliaram rotação de culturas de aveia em sequência com milho e soja, e de azevém anual em sequência ao cultivo de milho e soja. Os autores observaram melhor simulação de produtividade de massa seca para a essas sequências de cultivo no sistema sem irrigação, com diferença entre os sistemas de RMSE de 80 g m⁻². A cultura da aveia apresentou coeficiente de correlação de 0,77, maior que a cultura do azevém e menor em relação as demais testadas na sequência.

Observou-se que a alteração do parâmetro de sensibilidade à vernalização (Vrn sensibilidade) possibilitou o atraso no início da fase reprodutiva, fazendo com que as poucas observações feitas de material reprodutivo em campo experimental estivessem no mesmo momento simulado pelo modelo, porém, com os cortes, observou-se em campo que o potencial reprodutivo foi menor do que o simulado pelo modelo. Esse problema poderia ser solucionado se no modelo Oats fosse acrescentado um conjunto de parâmetros que relacionassem o corte ao potencial de rebrotação e reprodutivo.

O fato de o modelo não simular bem as variáveis produtivas dos dois ciclos iniciais do sistema irrigado, em ambos os anos, não tem relação com os parâmetros básicos dos modelos, como Tb, RUE e coeficiente de extinção da luz (k), pois os valores adotados para esses parâmetros estão de acordo com os de outros trabalhos. O valor de Tb = 0 (SONEGO et al., 1999; ALVES, 2002), RUE para espécies de aveia variando de 1,5 a 1,86 (ALVES, 2002; ZHANG et al., 2019). O k permaneceu dentro da faixa estimada para a cultivar IAPAR 61 por Alves, (2002), o qual variou conforme o tratamento de N aplicado, no estabelecimento de 0,451 a 0,677 e na rebrota de 0,515 a 0,674.

As respostas da simulação necessitam ser aprimoradas quanto ao padrão de perfilhamento, principalmente por ser uma cultura anual forrageira e o regime de cortes constantes influenciam o potencial de rebrotação para o próximo ciclo. A população de colmos pode ficar subestimada, uma vez que foi plantada em linha e contada sob uma área padronizada.

Para o parâmetro de sensibilidade ao fotoperíodo foi adotado o valor de 6, igual ao da cultivar Algerian e maior que o utilizado para *Avena sativa* por Zhang et al. (2019). Embora sejam espécies do mesmo gênero, os

diferentes genótipos da aveia diferem quanto ao início da floração em relação ao fotoperíodo (LOCATELLI et al., 2008).

A partir da simulação do conteúdo de água no solo, foi possível observar, simulações precisas e exatas para as camadas iniciais do solo até 0,30 m e menos precisas abaixo dessa profundidade. Esse comportamento também foi observado por outros autores. Santos et al. (2019) utilizando o modelo CSM-CROPGRO-Perennial Forage avaliaram a simulação da umidade do solo durante o experimento com capim-marandu e observaram melhor exatidão na camada de 0 a 0,20 m, com queda ao longo do perfil do solo até 1 metro e erro máximo de 0,078 cm³ cm⁻³.

Jing et al. (2021) avaliaram respostas de umidade do solo ao longo de ciclos de crescimento da cultura do trigo em vários anos, utilizando três modelos para trigo da plataforma DSSAT: CERES, CROPSIM, NWHEAT. Observaram uma eficiência de modelagem média 0,54 na camada de 0 a 1,2 m para ciclos seguidos do cultivo de trigo e eficiência menor de 0,23 para os ciclos intercalados entre períodos com pousio. Os mesmos autores também observaram menores erros e eficiência da modelagem maior na camada de 0,15 a 0,30 m em relação a de 0 a 0,15 m. Nesse experimento, foi observado melhor simulação na camada de 0,10 a 0,20 com NSE de 0,84.

A simulação foi realizada de forma contínua nos dois anos experimentais, dessa forma a condição e umidade do solo inicial ao Experimento 2 não foi ajustada levando a simulação incorreta da quantidade de água nas camadas mais profundas (Figura 8). A menor precisão do modelo nas camadas iniciais, também está relacionada as condições iniciais do solo em relação a umidade do solo em profundidade. Observa-se que isso pode influenciar o resultado da simulação e predição de biomassa principalmente em condições de limitação de água no crescimento (OJEDA et al., 2018b).

Os resultados apresentados se limitam nas condições climáticas do local testado. Assim resultados de simulações em outras localidades poderão trazer novas perspectivas e observações para inserir no modelo APSIM-*Oats* para a cultura da aveia preta.

3.5. Conclusão

A partir das observações visualizadas desse trabalho, o modelo APSIM-*Oats* mostrou-se capaz de estimar a biomassa viva, a massa de folha, a massa de colmo e a área foliar específica para a cultivar de aveia preta IAPAR 61 Ibiporã sob regime de corte. As variáveis da planta com problemas de estimativa são o Índice de Área Foliar, a massa de material morto e a população de perfilhos. O modelo mostrou-se mais eficiente na simulação sob cultivo em sequeiro em comparação ao irrigado, principalmente nos dois ciclos iniciais de cultivos, quando o modelo não estimou o valor de biomassa viva observada em campo.

Em relação à simulação da umidade do solo, o modelo apresentou maior eficiência nas primeiras camadas do solo até a profundidade de 0,30 m, que é a camada de maior interesse para culturas anuais com sistema radicular superficial como o da aveia preta.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, no. 56, p. 300, 1998. DOI 10.1016/j.eja.2010.12.001. Available at: <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>.
- ALVES, S. J. **Dinâmica De Crescimento Da Aveia Preta Sob Diferentes Doses De Nitrogênio E Ajuste De Modelo Matemático De Rendimento Potencial Em Função De Parâmetros Climáticos**. 2002. 110 f. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANA SETOR, 2002. <https://doi.org/10.5380/rsa.v4i1.1080>.
- APSIM. SoilWat documentation. 2020. **APSIM Initiative**. Available at: <https://www.apsim.info/documentation/model-documentation/soil-modules-documentation/soilwat/>. Accessed on: 5 Feb. 2020.
- BARTH NETO, A.; SAVIAN, J. V.; SCHONS, R. M. T.; BONNET, O. J. F.; CANTO, M. W. do; MORAES, A. de; LEMAIRE, G.; CARVALHO, P. C. de F. Italian ryegrass establishment by self-seeding in integrated crop – livestock systems: Effects of grazing management and crop rotation strategies. **European Journal of Agronomy**, vol. 57, p. 77–83, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.04.005>.
- BROWN, H. E.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P.; TEIXEIRA, E. I.; ZYSKOWSKI, R. F.; HARGREAVES, J. N. G.; MOOT, D. J. Environmental Modelling & Software Plant Modelling Framework : Software for building and running crop models on the APSIM platform. **Environmental Modelling and Software**, vol. 62, p. 385–398, 2014. DOI 10.1016/j.envsoft.2014.09.005. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.005>.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Valiação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, vol. 5, no. 1, p. 96–97, 1997. .
- CÂNDIDO, M. J. D.; LOPES, M. N.; FURTADO, R. N.; POMPEU, R. C. F. F. Potencial e desafios para a produção animal sustentável em pastagens cultivadas do Nordeste. **Revista Científica de Produção Animal**, vol. 20, no. 1, p. 59–70, 2018. .
- DALGLIESH, N.; HOCHMAN, Z.; HUTH, N.; HOLZWORTH, D. **Field Protocol to APSOIL characterisations. CSIRO agriculture and food**. Australia: [s. n.], 2016.
- DEEN, W.; COUSENS, R.; WARRINGA, J.; BASTIAANS, L.; CARBERRY, P.; REBEL, K.; RIHA, S.; MURPHY, C.; BENJAMIN, L. R.; CLOUGHLEY, C.; CUSSANS, J.; FORCELLA, F.; HUNT, T.; JAMIESON, P.; LINDQUIST, J.; WANG, E. An evaluation of four crop: Weed competition models using a common data set. **Weed Research**, vol. 43, no. 2, p. 116–129, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3180.2003.00323.x>.
- FESSEHAZION, M. K.; ANNANDALE, J. G.; EVERSON, C. S.; STIRZAKER, R. J.; TESFAMARIAM, E. H. Evaluating of soil water balance (SWB-Sci) model for water and nitrogen interactions in pasture: Example using annual ryegrass. **Agricultural Water Management**, vol. 146, p. 238–248, 2014. .
- HAUN, J. R. Visual Quantification of Wheat Development. **Agronomy Journal**, vol. 65, no. 1, p. 116–119, 1973. <https://doi.org/10.2134/agronj1973.00021962006500010035x>.
- HORST, E. H.; NEUMANN, M.; MAREZE, J.; LEÃO, G. F. M.; BUMBIERIS JÚNIOR, V. H.; MENDES, M. C. Nutritional composition of pre-dried silage of different winter cereals. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, vol. 40, no. e42500, p. 1–7, 2018. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v40i1.42500>.

- IAPAR. **Aveia Preta IAPAR 61 IBIPORÃ. Instituto Agronomico Do Paraná.** Londrina-PR: [s. n.], 2000.
- JAMIESON, P. D.; BROOKING, I. R.; PORTER, J. R.; WILSON, D. R. Prediction of leaf appearance in wheat: a question of temperature. **Field Crops Research**, vol. 41, no. 1, p. 35–44, 1995. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00102-I](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00102-I).
- JING, Q.; MCCONKEY, B.; QIAN, B.; SMITH, W.; GRANT, B.; SHANG, J.; LIU, J.; BINDRABAN, P.; LUCE, M. St. Assessing water management effects on spring wheat yield in the Canadian Prairies using DSSAT wheat models. **Agricultural Water Management**, vol. 244, no. May 2020, p. 106591, 2021. DOI 10.1016/j.agwat.2020.106591. Available at: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377420321387>.
- JONES, C. A.; KINIRY, J. R. **CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development.** College Station, Texas: Texas A&M University Press, 1986.
- JONES, J. W.; ANTLE, J. M.; BASSO, B.; BOOTE, K. J.; CONANT, R. T.; FOSTER, I.; GODFRAY, H. C. J.; HERRERO, M.; HOWITT, R. E.; JANSSEN, S.; KEATING, B. A.; MUNOZ-CARPENA, R.; PORTER, C. H.; ROSENZWEIG, C.; WHEELER, T. R. Toward a new generation of agricultural system data , models , and knowledge products : State of agricultural systems science. **Agricultural Systems**, vol. 155, p. 269–288, 2017. .
- KUNRATH, T. R.; CADENAZZI, M.; BRAMBILLA, D. M.; ANGHINONI, I.; MORAES, A. de; BARRO, R. S.; CARVALHO, P. C. de F. Management targets for continuously stocked mixed oat × annual ryegrass pasture in a no-till integrated crop – livestock system. **European Journal of Agronomy**, vol. 57, p. 71–76, 2014. DOI 10.1016/j.eja.2013.09.013. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.013>.
- LITTLEBOY, M.; SILBURN, D. M.; FREEBAIRN, D. M.; WOODRUFF, D. R.; HAMMER, G. L.; LESLIE, J. K. Impact of soil erosion on production in cropping systems .I. Development and validation of a simulation model. **Soil Research**, vol. 30, no. 5, p. 757–774, 1992. Available at: <https://doi.org/10.1071/SR9920757>.
- LIU, W.; YU, K.; HE, T.; LI, F.; ZHANG, D.; LIU, J. The low temperature induced physiological responses of avena nuda L., a cold-tolerant plant species. **The Scientific World Journal**, vol. 2013, p. 1–8, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/658793>.
- LOCATELLI, A. B.; FEDERIZZI, L. C.; MILACH, S. C. K.; MCELROY, A. R. Flowering time in oat: Genotype characterization for photoperiod and vernalization response. **Field Crops Research**, vol. 106, no. 3, p. 242–247, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.12.006>.
- MOREIRA, G. L. P.; MOREIRA, E. D. S.; PRATES, C. J. N.; CARDOSO JÚNIOR, N. D. S.; VIANA, A. E. S.; LOPES, S. C. Produtividade de biomassa e composição bromatológica de genótipos de aveia forrageira em Vitória da Conquista, BA. **Scientia Plena**, vol. 13, no. 3, p. 1–10, 2017. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2017.030201>.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, vol. 10, no. 3, p. 282–290, 1970. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6). Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>.
- OJEDA, J J; PEMBLETON, K. G.; CAVIGLIA, O. P.; ISLAM, M. R.; AGNUSDEI, M. G.; GARCIA, S. C. Modelling forage yield and water productivity of continuous crop sequences in the Argentinian Pampas. **European Journal of Agronomy**, vol. 92, no. November 2017, p. 84–96, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.004>.

- OJEDA, J. J.; PEMBLETON, K. G.; ISLAM, M. R.; AGNUSDEI, M. G.; GARCIA, S. C. Evaluation of the agricultural production systems simulator simulating Lucerne and annual ryegrass dry matter yield in the Argentine Pampas and south-eastern Australia. **Agricultural Systems**, vol. 143, p. 61–75, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.12.005>.
- OJEDA, J. J.; CAVIGLIAB, O. P.; IRISARRID, J. G. N.; AGNUSDEI, M. G. Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol. 259, no. October 2017, p. 1–10, 2018. DOI 10.1016/j.agrformet.2018.04.014. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.014>.
- PEAKE, A.; BROWN, H.; ZYSKOWSKI, R.; TEIXEIRA, E. I.; HUTH, N. The APSIM Oats Model. , p. 36, 2020. Available at: <https://apsimdev.apsim.info/ApsimX/Releases/2020.11.20.5818/Oats.pdf>.
- PEAKE, A.; WHITBREAD, A.; DAVOREN, B.; BRAUN, J.; LIMPUS, S. The development of a model in APSIM for the simulation of grazing oats and oaten hay. 2008. **14th Australian Agronomy Conference** [...]. [S. l.: s. n.], 2008. p. 4.
- PEMBLETON, K. G.; RAWNSLEY, R. P.; JACOBS, J. L.; MICKAN, F. J.; CULLEN, B. R.; RAMILAN, T. Evaluating the accuracy of the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) simulating growth, development, and herbage nutritive characteristics of forage crops grown in the south-eastern dairy regions of Australia. **Crop & Pasture Science**, vol. 64, p. 147–164, 2013. .
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; BETTIOL, G. M.; BOSI, C.; PETINARI, I. B. **Zoneamento de aptidão climática para os capins Marandu e Tanzânia na região Sudeste do Brasil**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2012. Available at: <http://www.cppse.embrapa.br/sites/default/files/principal/publicacao/Documentos108.pdf>.
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da; SENTELHAS, P. C. An integrated agrometeorological model to simulate Marandu palisade grass productivity. **Field Crops Research**, vol. 224, no. 1 July, p. 13–21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.04.015>.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C. **Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura de Urochloa brizantha cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado**. 2019. 109 f. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz,” 2019.
- SANTOS, M. G.; BOOTE, K. J.; FARIA, R. T.; HOOGENBOOM, G. Simulation of productivity and soil moisture under Marandu palisade grass using the CSM-CROPGRO-Perennial Forage model. **Crop and Pasture Science**, vol. 70, p. 159–168, 2019. <https://doi.org/10.1071/CP18258>.
- SBRISSIA, A. F.; DUCHINI, P. G.; ECHEVERRIA, J. R.; MIQUELOTO, T.; BERNARDON, A.; AMÉRICO, L. F. Animal production on cultivated pasturelands in regions of temperate climate of Latin America. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**, vol. 25(1):2017, no. January, 2017. .
- SONEGO, M.; JAMIESON, P. D.; MOOT, D. J.; MARTIN, R. J. Development and growth of oat leaves at different temperatures and nitrogen levels. **Agronomy New Zealand**, vol. 29, p. 75–81, 1999. .
- TONATO, F.; PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; PEQUENO, D. N. L. Aveia preta e azevém anual colhidos por interceptação de luz ou intervalo fixo de tempo em sistemas integrados de agricultura e pecuária no Estado de São Paulo. **Ciência Rural**, vol. 44, no. 1, p. 104–110, 2014. .

- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, vol. 90, no. C5, p. 8995–9005, 1985. DOI 10.1029/JC090iC05p08995. Available at: <http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>.
- ZADOKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, C. F. A decimal code for the growth stages of cereals. **Weed Research**, vol. 14, p. 415–421, 1974. [https://doi.org/10.1016/s0262-1762\(99\)80614-2](https://doi.org/10.1016/s0262-1762(99)80614-2).
- ZHANG, Y.; ZHANG, L.; YANG, N.; HUTH, N.; WANG, E.; WERF, W. Van Der; EVERS, J. B.; WANG, Q.; ZHANG, D.; WANG, R.; GAO, H.; ANTEN, N. P. R. Optimized sowing time windows mitigate climate risks for oats production under cool semi-arid growing conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, vol. 266–267, no. January, p. 184–197, 2019. DOI 10.1016/j.agrformet.2018.12.019. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.12.019>.

4. ESTRUTURAÇÃO DE UM MODELO PARA SIMULAÇÃO DO CRESCIMENTO DO AZEVÉM ANUAL NA PLATAFORMA APSIM (*APSIM-Annual Ryegrass*)

Resumo

O azevém anual é uma das forrageiras invernais mais utilizadas no Brasil. Porém, modelos de crescimento ainda não foram desenvolvidos para essa cultura. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi a construção de um modelo para a cultura do azevém anual na plataforma APSIM. Para tanto foram utilizados dois ciclos completos da cultura em dois anos diferentes, em experimentos conduzidos em Piracicaba/SP. Esses experimentos foram conduzidos de forma semelhante, utilizando a cultivar BRS Ponteio sob Irrigação e sem Irrigação (Sequeiro), sob regime de corte, semeados em linha e no mesmo período dos anos de 2018 e 2019. Foram avaliadas as características da planta: massa de folhas, colmos, inflorescência, material morto, altura, índice de área foliar, área foliar específica e altura até a última folha expandida. Também foi avaliada a umidade do solo até 0,70 m com sonda capacitiva. Nesse estudo foram calibrados os parâmetros dos submodelos dos órgãos (folha, colmo, raiz, espiga e grãos) e foi construído o submodelo de Fenologia (fases fenológicas e passagem entre elas). Em todos os submodelos dos órgãos calibrou-se a fração de partição estrutural por fase fenológica e a taxa de senescência ou tempo de vida da folha. No submodelo de folha, outros parâmetros foram ajustados, os relacionados a fotossíntese (eficiência de uso da radiação, temperaturas cardiais, fator de estresse hídrico), e o cálculo da altura e da área foliar específica máxima. Também se ajustou a velocidade potencial de crescimento da raiz. A avaliação entre os dados observados em campo e os estimados pelo modelo deu-se por meio do cálculo de índices estatísticos. Para as variáveis da planta, quando os experimentos foram analisados em conjunto, os resultados demonstraram maior precisão ($R^2 > 0,73$ e $NSE > 0,58$) para a massa total, massa de material vivo, massa de folha e colmo e altura. Para os dados de umidade do solo, as camadas superficiais de 0 a 0,30 m apresentaram melhor simulação em relação às mais profundas. Os resultados obtidos com esse estudo são uma primeira aproximação do modelo *APSIM-Annual Ryegrass*, o qual necessita de outros estudos com a cultura do azevém anual, com o objetivo de ajustar outros parâmetros e avaliações detalhadas da fenologia e da interceptação de radiação solar em diferentes manejos.

Palavras-chaves: BRS Ponteio, Forrageira de inverno, Irrigação, Sequeiro

Abstract

Annual ryegrass is one of the most used winter fodders in Brazil. However, growth models have not yet been developed for this culture. Thus, the aim of this work was to build a model for the annual ryegrass (Italian ryegrass) culture on the APSIM platform. For this purpose, two complete crop cycles were used in two different years in experiments conducted in Piracicaba/SP. These experiments were conducted in a similar way, using the cultivar BRS Ponteio under Irrigation and Rainfed, under a cut regime, sown in line and the same period of the years 2018 and 2019. The plant's characteristics were evaluated: leaves, stems, inflorescence, dead material, height, leaf area index, specific leaf area, and height to the last expanded leaf. Soil moisture up to 0.70 m was also evaluated with a capacitive probe. In this study, the parameters of the sub-models of the organs (leaf, stem, root, ear, and grains) were calibrated, and the Phenology sub-model (phenological phases and passage between them) was built in all submodels of the organs, the fraction of structural partition by phenological phase and the senescence rate or leaf time. Other parameters were adjusted in the leaf submodel related to photosynthesis (efficiency of radiation use, cardinal temperatures, water stress factor), and the calculation of the height and the maximum specific leaf area. The potential growth rate of the root was also adjusted. The evaluation of the data observed in the field versus those estimated by the model was made by calculating statistical indices. When the experiments were analyzed together for the plant variables, the results showed greater precision ($R^2 > 0,73$ and $NSE > 0,58$) for the total mass, live mass, leaf and stem mass, and height. For soil moisture data, the superficial layers from 0 to 0,30 m showed better simulation to 0,30 to 0,70m. The results obtained with this study are a first approximation of the *APSIM-Annual Ryegrass* model, which needs further studies with the annual ryegrass culture to adjust other parameters and detailed assessments of the phenology and interception of solar radiation in different managements.

Keywords: BRS Ponteio, winter forage, Irrigation, Rainfed

4.1. Introdução

Sistemas O azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.), apresenta importância econômica para os sistemas produtivos de animais a pasto no Brasil, principalmente nas regiões com características climáticas que permitem o seu cultivo. A importância também está relacionada ao fato dessa cultura oferecer uma alternativa para aumentar a oferta de forragem durante o período de baixo crescimento das forrageiras tropicais (PEZZOPANE et al., 2012, 2018; SBRISSIA et al., 2017).

Além disso, sendo uma forrageira de inverno, permite o cultivo em sistema exclusivo ou em consórcio (permanente ou temporário). O uso de consórcio entre culturas anuais e forrageiras temperadas (permanente) e a sobresemeadura de espécies forrageiras anuais em pastagens perenes (temporário) é adotado para melhorar a produtividade dos sistemas pecuários (OJEDA et al., 2018a). Outra vantagem na utilização do azevém está no alto potencial produtivo e qualidade nutricional (SBRISSIA et al., 2017).

O azevém é a forrageira de estação fria mais utilizada no Rio Grande do Sul (CONFORTIN et al., 2013), sendo importante também em outros locais da região Sul, parte da região Sudeste do Brasil, no Sul da África, e no Sul e Sudeste da Austrália (PEREIRA et al., 2008; BARTH NETO et al., 2014; FESSEHAZION et al., 2014; KUNRATH et al., 2014; OJEDA et al., 2018a).

Considerando a importância econômica que essa forrageira invernal representa para sistemas de criação de animais a pasto, os diferentes manejos que podem ser adotados e a complexidade das relações solo-planta-atmosfera nas várias regiões brasileiras, o uso de modelos de crescimento de culturas pode auxiliar no maior entendimento do sistemas de produção de forragem (JONES et al., 2017), aprofundando o conhecimento sobre o crescimento dessas plantas e suas interações hídricas.

Estudos com simulação de culturas forrageiras anuais inverniais são recentes, o primeiro foi o de Deen et al. (2003) que estudaram trigo (*Triticum aestivum* L., cv. Dollarbird) e azevém (*Lolium rigidum* cv. Guard) em monocultivo e em mistura sob condições irrigadas e sem irrigação, utilizando os seguintes modelos: ALMANAC, APSIM, CROPSIM, INTERCOM. O objetivo do estudo foi avaliar a competição entre as espécies utilizando modelos mais simplistas, quanto a características morfofisiológicas (DEEN et al., 2003).

Pembleton et al. (2013) avaliaram a acurácia do APSIM na simulação da produtividade do trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia (*Avena sativa* L.), colza (*Brassica napus* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.)) e azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) na Austrália. Nesse trabalho a cultura do azevém foi simulada com o modelo de plantas daninhas (APSIM-Weed) e observou-se uma subestimativa do acúmulo de biomassa, o mesmo ocorrendo para a colza, quando utilizado o modelo da canola.

Ojeda et al. (2016) também avaliaram a produção do azevém a partir do modelo de plantas daninhas do APSIM com dados obtidos nos Pampas Argentinos e no sul da Austrália e observaram superestimativa de massa seca na produção de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.), na primeira colheita. Os autores modificaram a fenologia e a eficiência de transpiração no modelo, encontrando melhor desempenho na simulação.

Ojeda et al. (2018b) simularam os rendimentos de sequencias entre forrageiras e culturas agrícolas em diferentes lugares. Utilizando as seguintes forrageiras: o azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.), a aveia (*Avena sativa* L.), o trigo (*Triticum aestivum* L.), a cevada (*Hordeum vulgare* L.) e a cultura da soja (*Glycine max* L.). O azevém anual foi simulado utilizando-se o modelo APSIM-Weed. Os modelos mostraram-se precisos na simulação, porém, em uma das localidades (Pergamino), a precisão do modelo na simulação do rendimento de massa seca sob irrigação foi ligeiramente menor em comparação com as condições de sequeiro.

Ao observar os trabalhos atuais, percebe-se a necessidade da criação de um modelo específico para a cultura do azevém anual. Além da estruturação desse modelo, é necessário avaliá-lo por meio de estudos de calibração. Dessa forma, o objetivo principal deste estudo foi estruturar um modelo para simulação da cultura do azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) cv. BRS Ponteio, utilizando a plataforma APSIM® e avaliar as respostas das simulações.

4.2. Material e Métodos

Os dados utilizados para a parametrização do modelo do azevém foram originados a partir de dois experimentos realizados nos anos de 2018 e 2019 em área experimental na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), em Piracicaba/SP (22° 42' 15"S 47°37' 23" O, alt. 546m). Os ciclos de crescimento e cortes foram compreendidos entre os meses de maio a dezembro em 2018 e de maio e novembro de 2019.

Para a parametrização dos modelos foram utilizados dois anos de cultivo do azevém anual, sendo que no primeiro ano (2018) foi conduzido o Experimento 1 e no segundo ano (2019) o Experimento 2. Em ambos os experimentos foi utilizada a mesma cultivar de azevém (*Lolium multiflorum* cv. BRS Ponteio), a cultivar foi escolhida por ser bastante utilizado nos sistemas produtivos. Os experimentos foram conduzidos da maneira mais padronizada possível em relação ao manejo e às variáveis analisadas. A semeadura ocorreu em linhas espaçadas entre 0,17 a 0,20 m. Em ambos os anos, o experimento foi alocado de forma semelhante e no mesmo local. Os tratamentos avaliados foram: Irrigado e sem irrigação (Sequeiro). Cada tratamento possuía área total de 90 m² e foram separados por um corredor conduzido com a mesma cultura de 33,7 m². As parcelas onde ocorreram a coleta de forragem, foram localizadas ao centro das áreas e tinham o tamanho de 9m² cada, sendo separadas em 4 repetições, em parcelas com área individual de 9 m² cada (Figura 1).

Figura 1. Representação esquemática do experimento (esquerda) e fotos do local (direita). Experimento conduzido em Piracicaba/SP, durante 2018 (A) e 2019 (B).

Entre um ano experimental e outro a área permaneceu em pousio, sendo feitas capinas e controle químico das plantas espontâneas. Em ambos os anos, antes da instalação dos experimentos foram coletadas amostras de solo para análise química, nas profundidades de 0 a 0,40 m, e para verificar necessidade da correção da fertilidade do solo.

As análises físicas necessárias à caracterização do solo foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biosistemas (ESALQ/USP) por Prudente Junior, (2019), dentre elas a análise granulométrica, a curva característica de retenção de água: capacidade de campo (DUL), ponto de murcha permanente (LL15) e ponto de saturação (SAT), além da densidade volumétrica (BD).

A partir da curva característica de retenção de água no solo realizada em laboratório, foi necessário ajustar as umidades volumétricas (θ) representativas dos pontos LL15, DUL e SAT das profundidades. Os dados observados em campo pela sonda FDR, principalmente em relação aos dados de LL15 e DUL são abaixo dos dados estimados em condições de laboratório. Dessa forma foi necessário ajustar os parâmetros a fim de minimizar o erro, utilizando como balizador a raiz quadrada do erro médio (RMSE). O ajuste para capacidade de campo foi realizado considerando somente os períodos sem grandes volumes de chuvas e para o ponto de murcha permanente aqueles após maiores intervalos sem chuva. A variável Air dry foi ajustada após o ajuste da LL15. A Figura 2.a. demonstra os valores da composição granulométrica, discriminados por profundidade do solo, e a Figura 2.b. os pontos de umidade do solo da curva de retenção de água ao longo do perfil do solo.

Figura 2. a. Características físicas do solo: composição granulométrica (argila, areia e silte), densidade do solo (BD) e **b.** Solo seco ao ar (Air dry), ponto de murcha permanente (LL15), capacidade de campo (DUL), e ponto de saturação (SAT). Valores do solo da área experimental utilizada para simulação no APSIM, Piracicaba/SP.

A adubação nitrogenada de manutenção do azevém foi feita com ureia, logo após o corte em cada ciclo de crescimento em ambos os experimentos, na dose de 50 kg ha⁻¹ de N, esse valor é frequentemente recomendado para a cultura do azevém anual (CUNHA et al., 2016).

4.2.1. Experimento 1

O Experimento 1 foi semeado manualmente no dia 28 de abril de 2018, em linhas espaçadas em 0,20 m com taxa de semeadura de 55 kg ha⁻¹. A coleta do solo para caracterização química (Tabela 1) foi realizada no dia anterior à semeadura.

Tabela 1. Características químicas iniciais do solo no Experimento 1, realizado em 2018, em Piracicaba/SP. Nitrato (NO₃), amônia (NH₄), pH (água), condutividade elétrica (EC) e conteúdo de carbono orgânico (OC).

Profundidade	NO ₃	NH ₄	pH	EC	OC
Unidades m	ppm	ppm		dS m ⁻¹	%
0 - 0,20	49,00	84,00	5,60	0,38	1,30
0,20 - 0,40	46,00	60,00	5,86	0,32	0,90
0,40 - 0,60	60,00	130,00	6,35	0,34	0,70
0,60 - 0,80	53,00	49,00	6,92	0,35	0,60

A duração do primeiro ciclo de crescimento foi de 54 dias, sendo que os demais cinco ciclos tiveram duração variável de 25 a 28 dias. Foram conduzidos 6 ciclos completos do tratamento irrigado e em sequeiro e um apenas em sequeiro, pois as plantas das parcelas irrigadas não se restabeleceram após o corte anterior (06/11/2018).

Para o manejo do tratamento Irrigado por aspersão, considerou-se a profundidade de 0,50 m e o fator de depleção igual a 30% da capacidade de água disponível por se tratar de condições ótimas ao crescimento da cultura (ALLEN et al., 1998). Os limites de umidade extraídos da curva de retenção de água no solo, realizada em laboratório, foram: capacidade de campo (θ_{CC}) = 44% e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) = 33%. As lâminas d'água de irrigação foram calculadas para que a umidade retornasse à capacidade de campo. Os tensiômetros foram instalados em três profundidades (0,15; 0,30 e 0,60 m), com quatro repetições. Todas as medições foram realizadas a cada quatro dias.

Os dados climáticos diários de entrada do modelo são oriundos da estação meteorológica automática da ESALQ/USP, localizada a 100 m da área experimental, e estão apresentados na Tabela 2 juntamente com a irrigação aplicada por ciclo.

Tabela 2. Dados climáticos médios observados na estação meteorológica da ESALQ/USP, Piracicaba/SP para os ciclos de Azevém anual de 28/04 a 04/12/2018. Radiação solar (Rs), Temperatura máxima (Tmax) Temperaturas mínima (Tmin), velocidade do vento (u), chuva (R) e Irrigação (I).

Ciclos	Data	Rs	Tmax	Tmin	u	R	I
	(início – fim)	(MJ m ⁻²)	(°C)	(°C)	(m s ⁻¹)	(mm)	mm
1	28/04 a 21/06/2018	13,6	27,5	13,5	1,4	21,8	93,2
2	22/06 a 17/07/2018	13,5	28,5	11,1	1,4	0,0	77,5
3	18/07 a 14/08/2018	13,3	26,2	11,8	1,5	97,5	41,7
4	15/08 a 10/09/2018	17,4	28,2	12,1	1,7	10,9	53,9
5	11/09 a 08/10/2018	16,7	28,9	16,7	1,6	78,5	49,3
6	09/10 a 06/11/2018	17,0	28,1	14,1	1,7	122,4	6,1
7*	07/11 a 04/12/2018	18,6	29,3	18,4	1,9	229,9	--

*Somente observação no tratamento em Sequieiro.

O acompanhamento da cultura foi realizado com medições semanais de altura do dossel forrageiro, da produtividade de forragem (massa seca da parte aérea, separada em folha e colmo) e da área foliar específica (SLA).

A altura do dossel forrageiro (ADF) foi medida com o auxílio de uma fita métrica, medindo-se a altura até a última folha expandida. Na medição de produtividade, a colheita simulou um sistema de pastejo com lotação intermitente, com a altura do resíduo de 0,07 m. O material foi cortado acima da altura do resíduo, no interior de quatro retângulos de amostragem com área individual de 0,25 m².

Após o corte, as amostras foram levadas ao laboratório para realizar a separação morfológica: folha, colmo, material morto e inflorescência, a pesagem (massa fresca da parte aérea – MFPA) e a determinação da percentagem de matéria seca (MS%). Ao final de cada ciclo de corte, a área total das parcelas foi rebaixada com roçadeira costal até a altura de resíduo predefinida.

A área foliar específica (SLA) foi determinada nas quatro coletas durante o ciclo, separando-se 0,05 kg de folhas de cada repetição, coletadas em separado das amostragens de produção. A estimativa foi feita com o auxílio de um integrador de área foliar (LI-3100C, Li-Cor®).

A massa do resíduo abaixo dos 0,07 m foi avaliada apenas no final dos ciclos 2, 6 e 7, foi coletada com tesoura de poda e em laboratório foi realizada a separação morfológica (folha, colmo e material morto) e secagem em estufa de circulação de ar até atingir massa constante, para determinação de massa seca.

4.2.2. Experimento 2

O Experimento 2 foi semeado manualmente no dia 28 de abril de 2019, em linhas espaçadas em 0,17 m com taxa de semeadura de 50 kg ha⁻¹. A coleta do solo para caracterização química (Tabela 3) foi realizada no dia anterior à semeadura.

Tabela 3. Características químicas iniciais do solo no Experimento 2, realizado em 2019, em Piracicaba/SP. Nitrato (NO₃), amônia (NH₄), pH (água), condutividade elétrica (EC) e conteúdo de carbono orgânico (OC).

Profundidade	NO ₃	NH ₄	pH	EC	OC
Unidades m	ppm	ppm		dS m ⁻¹	%
0 - 0,20	53,00	25,00	7,25	0,39	1,30
0,20 - 0,40	21,00	46,00	7,21	0,25	1,00
0,40 - 0,60	60,00	46,00	6,78	0,44	0,70
0,60 - 0,80	60,00	46,00	6,78	0,44	0,70

O manejo da irrigação foi realizado por meio de tensiômetros (0,15m; 0,30 e 0,45 m) e o monitoramento da umidade do solo, com o auxílio de uma sonda capacitiva Diviner®, medindo-se umidade na camada de 0-0,70 m, com 2 repetições por tratamento. As medições foram realizadas a cada três dias e considerou-se a profundidade de 0,30 m, as avaliações das demais características foram semelhantes às do Experimento 1.

Foram conduzidos 5 ciclos completos de crescimento nos tratamentos Irrigado e Sequeiro e uma observação final do ciclo em sequeiro, pois as plantas retornaram após o corte, porém permaneceram vivas somente por 15 dias. Os ciclos de crescimento apresentaram número variável de dias, conforme o crescimento da cultura. O primeiro ciclo de estabelecimento foi maior, com duração de 60 dias para o completo desenvolvimento e cobertura do solo. Os demais ciclos tiveram duração de 26 a 28 dias.

Os dados climáticos observados para o Experimento 2 também foram obtidos da estação meteorológica automática da ESALQ/USP, e estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados climáticos médios observados na estação meteorológica da ESALQ/USP, Piracicaba/SP para os ciclos de Azevém anual de 28/04 a 01/11/2019. Radiação solar (Rs), Temperatura máxima (Tmax) Temperaturas mínima (Tmin), velocidade do vento (u), chuva (R) e Irrigação (I).

Ciclo	Data	Rs	Tmax	Tmin	u	R	I
	(início - fim)	(MJ m ⁻²)	(°C)	(°C)	(m s ⁻¹)	(mm)	mm
1	28/04 a 28/06/2019	13,7	27,4	14,3	1,3	55,6	155,4
2	29/06 a 25/07/2019	14,3	25,7	9,9	1,6	52,0	89,9
3	26/07 a 22/08/2019	15,2	27,5	12,0	1,8	4,7	142,9
4	23/08 a 20/09/2019	18,5	30,8	14,8	1,8	36,9	92,8
5	21/09 a 18/10/2019	20,6	31,5	16,5	2,0	30,5	75,7
6*	19/10 a 01/11/2019	23,5	33,2	18,2	2,0	102,1	0

*Somente observação no tratamento em Sequeiro.

O experimento conduzido no ano de 2019, foi realizado seguindo o mesmo protocolo de avaliação do experimento de 2018, com a diferença de que apenas no primeiro ciclo foram realizadas quatro avaliações e nos demais apenas ao final do ciclo. A quantificação da massa de resíduo foi realizada no final de cada ciclo, a partir do segundo, tanto para as parcelas em sequeiro quanto para as irrigadas.

Adicionalmente a as análises das plantas, no Experimento 2, foram realizadas 3 coletas de amostragem de raiz no sistema Irrigado, ao final do ciclo 2, 3 e 4. As coletas foram realizadas por amostragem, utilizando trado de caneco (de 6,9 cm de diâmetro), com 4 repetições por profundidade, a cada 0,10 m de 0 a 0,70 m. Após a coleta, as

amostras foram condicionadas em sacos plásticos. Posteriormente, foram submersas em água para facilitar a separação do sistema radicular das partículas de solo, e lavadas em água corrente para separá-las, utilizando-se tela de lavagem de 0,5 mm e pinça, para retenção das raízes. Após esse procedimento, as amostras foram acomodadas em sacos de papel com auxílio de pinça, e levadas a uma estufa de circulação forçada de ar, para secagem a 65°C até atingir peso constante. Depois de secas, as raízes foram separadas com pinça para retirar os grânulos de argila, e foi determinada a massa seca de raízes com o auxílio de balança de precisão (0,0005 g).

4.2.3. Descrição do modelo APSIM-*Annual Ryegrass*

O APSIM-*Annual Ryegrass* foi desenvolvido a partir desse estudo, o mesmo foi estruturado a partir da estrutura básica padrão do *Plant Modelling Framework* (PMF) desenvolvido por Brown et al. (2014). Essa estrutura permite o acoplamento de modelos e submodelos em estrutura de árvore com os nós-filhos para a construção da simulação.

No caso do azevém, foram selecionados os submodelos: Arbitração (Biomassa e Nitrogênio estruturais, metabólicos e de reserva), Fenologia e os relacionados aos órgãos da planta (Folha, Colmo, Raiz, Espiga e Grão).

A fenologia do modelo APSIM-*Annual Ryegrass* altera-se conforme o efeito da temperatura, relacionada ao conceito chamado de tempo termal, sendo que a mudança entre as fases é conduzida a partir da soma térmica característica de cada fase.

O submodelo do órgão folha calcula a fixação de biomassa por meio dos parâmetros da fotossíntese, também esse submodelo apresenta uma função inicial de peso, concentração mínima e máxima de Nitrogênio da folha, fatores de realocação e translocação, coeficiente de extinção, senescência e desprendimento da folha, e uma função para cálculo da área foliar específica (valor máximo por fase fenológica) e fator de água.

A fixação da biomassa é modelada como o produto da radiação interceptada e sua eficiência de conversão, a eficiência de uso da radiação (RUE) (MONTEITH, 1977). A fotossíntese potencial calculada usando RUE é então ajustada de acordo com fatores de estresse, que são responsáveis pela penalização por nitrogênio (FN), temperatura do ar (FT), déficit de pressão de vapor (FVPD), déficit hídrico (FW) e concentração atmosférica de CO₂ (FCO₂).

Os submodelos de Colmo, Espiga e Grãos seguem a mesma estrutura, contendo a demanda de matéria seca (estrutural e de reserva - partição), demanda de nitrogênio (estrutural, metabólico), concentração mínima e máxima de nitrogênio, senescência e desprendimento. O submodelo da Raiz apresenta além dessas características colocadas nos anteriores, a velocidade de crescimento, e absorção de água e nitrogênio.

4.2.4. Parametrização do modelo

Para a parametrização foram utilizados os dados sob condições ótima considerando as parcelas sob Irrigação e após depois também foram testadas as respostas com déficit hídrico (Sequeiro). Para a montagem do modelo, foram testados os modelos com culturas com algumas características morfológicas parecidas, dentre os quais APSIM-*Barley*, APSIM-*Wheat* APSIM-*Oats* e a eficiência destes em simular o azevém anual para possível adaptação. Nenhum destes mostrou-se promissor para início do estudo, então optou-se pela estruturação de um modelo levando como base alguns parâmetros internos a esses modelos. Pembleton et al. (2013) também considera boa a estratégia de modificar um modelo de uma cultura para outro.

Após a adequação da arquitetura do modelo em nós-filhos, como é utilizado na plataforma APSIM®, foi analisado quais parâmetros seriam modificados dentro dos submodelos dos órgãos. Para isso, o estudo baseou-se em trabalhos de referência, modelos existentes na plataforma de outras espécies forrageiras invernais (APSIM-*Oats*, APSIM-*Barley* e APSIM-*Wheat*) e do modelo Agpasture da cultura do azevém perene (AGPRyegrass), além dos dados observados nos experimentos. Assim, foi possível a adequação de alguns parâmetros importantes.

No submodelo de Folha, foram adotados valores para os coeficientes da fotossíntese, índice de área foliar, função da área foliar específica e partição. No submodelo do Colmo e Raiz foram adotados valores para taxa de senescência e fração de partição, além disso, no submodelo da raiz foi avaliado o potencial de velocidade de crescimento da raiz. Para o submodelo da Espiga e de Grãos foram calibrados valores para a fração de partição.

Também foram analisados os parâmetros do modelo de água no solo (APSIM-*SoiWat*) e modificados conforme outras referências. Além destes, o coeficiente de extração de água (KL) por camada do solo foi calibrado.

Foram adicionadas as informações de manejo dos experimentos (semeadura, adubação, irrigação, datas de corte e massa de folha e colmo no resíduo de cada corte) e os dados observados nos experimentos 1 e 2. Foi utilizado o processo de tentativa e erro, observando os parâmetros e as respostas simulados e, dessa forma, ajustando até que fossem atingidas as melhores estimativas possíveis para as variáveis monitoradas.

4.2.5. Avaliação do modelo

Após a calibração, foram construídos os gráficos de análise comparando os dados observados e os estimados e o calculados alguns coeficientes, erros e índices. Estes foram: coeficiente de determinação (R^2) da análise de regressão (observados x simulados), coeficiente de eficiência da modelagem (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970), índice de concordância (d) de Willmott (WILLMOTT et al., 1985) e de confiança (c) de Camargo; Sentelhas (1997). Para a análise de erros foram considerados: erro médio (ME); erro absoluto médio (MAE) raiz quadrada do erro médio (RMSE). As equações utilizadas foram as de 1 a 6.

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

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (2)$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2\right]} \quad (4)$$

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

$$c = \sqrt{R^2} \times d \quad (6)$$

4.3. Resultados

4.3.1. Parametrização do submodelo de Fenologia

As fases fenológicas foram alocadas conforme a observação da cultura e observação de outros modelos de crescimento de culturas C3. Assim, foram separadas em 10 fases fenológicas, essas estão apresentadas na Tabela 5. O modelo pressupõe, desde que haja água no solo, que a germinação seja concluída no dia seguinte à data de semeadura.

Tabela 5. Número (N) e nome das Fases fenológicas, estádios inicial e final da cultura do Azevém anual colocadas no modelo APSIM-*Annual Ryegrass*.

N	Nome da Fase	Estádio Inicial	Estádio Final
1	Germinativa	Semeadura	Germinação
2	Emergente	Germinação	Emergência
3	Vegetativa	Emergência	Primeira diferenciação de meristema floral
4	Pre-Reprodutiva	Primeira diferenciação de meristema floral	Primeira emissão de espiga
5	Reprodutiva inicial	Primeira emissão de espiga	Primeira floração
6	Reprodutiva média	Primeira floração	Início da Reprodução final
7	Reprodutiva final	Início da Reprodução final	Final da Reprodução final
8	Maturação	Final da Reprodução final	Maturidade fisiológica
9	Amadurecimento	Maturidade fisiológica	Maturidade de colheita
10	Pronto para colheita	Maturidade de colheita	-

A mudança entre as fases fenológicas ocorre a partir do cálculo de alcance de um tempo termal alvo (Figura 3). O tempo termal é calculado pelo modelo através do método de interpolação senoidal, em intervalos a cada 3 horas, da média entre as temperaturas máximas ($T_{\text{máx}}$) e mínima (T_{min}). A mudança da fase Germinativa para a Emergente simula o tempo até a emergência em função da profundidade de semeadura, nesse estudo adotada como padrão de 5 mm e, para aceleração disso, utiliza o alvo de tempo termal dado por uma equação = profundidade de semeadura x ShootRate + ShootLag. Ambos os valores foram obtidos do trabalho de Ojeda et al. (2016), que adotaram esses valores para o azevém anual, utilizando o APSIM-*Weed*, a partir de uma análise de sensibilidade (Figura 3).

As mudanças entre as demais fases fenológicas são padronizadas até atingir o valor alvo para tempo termal acumulado e início do próximo estágio (Figura 3). A fase Vegetativa, começa logo após a emergência e termina quando algum perfilho da planta diferencia o meristema apical para reprodutivo. A partir das observações em campo no Experimento 1, foi possível definir o início do aparecimento externo da primeira inflorescência (espiga), assim o período Pré-Reprodutivo inicia com a diferenciação do primeiro meristema apical para reprodutivo até esse momento (emissão da primeira inflorescência). Os estádios iniciais e final das demais fases (5 a 10) são explicados como segue na Tabela 5.

Figura 3. Processo de mudança das fases fenológicas para o modelo APSIM-*Annual Ryegrass*.

4.3.2. Parametrização dos submodelos dos órgãos da planta

A fração de partição para composição de biomassa estrutural foi calibrada para cada órgão da planta, distribuída para cada uma das fases fenológicas (1 a 10) entre folha, colmo, espiga, grãos e raiz (Figura 4). Até a fase 5 (Reprodutiva inicial) a partição foi separada entre os órgãos folha, colmo e raiz. A partir dessa fase foi acrescentado o órgão de espiga e consequentemente os grãos até a fase 8 (Maturação).

Figura 4. Fração de partição estrutural pela demanda de matéria seca para cada órgão (folha, colmo, espiga, grão e raiz) nas fases fenológicas calibradas para o modelo APSIM-Annual Ryegrass.

A taxa de senescência para os órgãos de colmo, espiga, grãos e raiz também foi ajustada conforme os valores na Tabela 6. Os órgãos colmo e raiz iniciam a senescência antes dos demais. O submodelo folha, apresenta o tempo de vida da folha, o qual é calculado pelo potencial em cada fase fenológica (Tabela 6).

Tabela 6. Tempo de vida da folha (dias) e taxa de senescência por dia para colmo, espiga, grão e raiz nas fases fenológicas calibradas para o modelo APSIM-Annual Ryegrass.

Fase Fenológica	Tempo de vida da folha (dia)	Taxa de senescência (d ⁻¹)			
		Colmo	Espiga	Grão	Raiz
0	60	0	0	0	0
1	60	0	0	0	0
2	60	0	0	0	0
3	60	0	0	0	0
4	60	0,001	0	0	0,001
5	60	0,003	0	0	0,001
6	60	0,003	0,001	0	0,001
7	60	0,003	0,001	0,001	0,001
8	60 - 30	0,004	0,001	0,001	0,001
9	20	0,005	0,001	0,001	0,01
10	10	0,009	0,01	0,01	0,01

No submodelo de folha foram calibrados os parâmetros da fotossíntese: eficiência de uso da radiação (RUE) e temperaturas cardeais, o coeficiente de extinção (k) e outros parâmetros apresentados na Tabela 7. O RUE foi definido a partir do melhor ajuste para os dados experimentais de crescimento da parte aérea do sistema irrigado e, após isso, foi dividido por 0,8 para acrescentar o correspondente destinado ao crescimento da raiz, atingindo assim o valor de 2,2 g MJ⁻¹, referente ao crescimento da planta toda (BOSI, 2017).

As temperaturas basal (tb), temperatura ótima 2 e temperatura basal máxima, foram adotadas conforme o modelo do APSIM-*Oats* e o trabalho de Ojeda et al. (2018a), a temperatura ótima 1 foi alterada de 15 (para aveia) para 10, pois, nos dados experimentais, identificou-se capacidade maior da planta de azevém em se adequar a temperaturas mais baixas (Tabela 7).

A partir dos dados de campo foi possível acrescentar no modelo a função para cálculo de altura (Tabela 7), utilizando como dados de entrada a biomassa viva acima do solo.

Tabela 7. Parâmetros calibrados para o submodelo de folha para o modelo APSIM-*Annual Ryegrass*.

Parâmetros	Valor ou equação	Referência
Máxima condutância estomática sob concentração de 350 ppm CO ₂ - gs (m/s)	0,011	APSIM- <i>Oats</i> APSIM- <i>Wheat</i>
R50 = Radiação solar em que a condutância estomática é reduzida em 50% (gs) gs = gs max/2	150	APSIM- <i>Oats</i>
Coeficiente de extinção de luz (k)	0,50	APSIM- <i>Wheat</i> APSIM- <i>Oats</i>
Coeficiente de extinção de luz do material morto	0,10	(COSTA et al., 2011)
Fotossíntese		
Eficiência de uso da radiação (RUE) (g MJ ⁻¹)	2,2	Calibrado
Fator de Temperatura (Ft) Máxima ponderação de temperatura ¹ = 0,75 X: Temperatura do ar ponderada (°C); Y: Ft	X: 0; 10; 25; 35; Y: 0; 1; 1; 0	APSIM- <i>Oats</i> (OJEDA et al., 2018a)
Fator hídrico (Fw) X: [Folha].Fw; Y: Fw	X: 0; 0,8; 1 Y: 0; 0,5; 1	Dados observados
Índice de Área foliar (LAI) mínimo	0,01 m ² m ⁻²	
Função de altura X: Biomassa Viva acima do solo; Y: Altura (mm)	X: 0; 100; 450 Y: 20; 300; 600	

No submodelo de folha foi acrescentado para o cálculo da área foliar específica máxima (SLA máx) o fator de estresse hídrico (Figura 5).

Figura 5. Funções para cálculo de área foliar específica máxima (SLA máx): a. SLA máximo versus fase fenológica; b. fator de estresse hídrico em relação ao fator de água na folha (Fw) calibrados para o modelo APSIM-*Annual Ryegrass*.

No submodelo de raiz, além da adequação da fração de partição, também foi alterada a velocidade potencial de crescimento da raiz, baseando-se no modelo de trigo da plataforma APSIM (BROWN; HUTH;

HOLZWORTH, 2020), o qual considera dois estádios fenológicos diferentes para calcular essa variável. Porém, para o azevém, foram acrescentadas três etapas (fases fenológicas) para o crescimento das raízes: Pré-Emergente, Vegetativo (Emergência até diferenciação do meristema) e Reprodutivo, sendo que os valores foram, 5 mm d⁻¹, 15 mm d⁻¹ e 5 mm d⁻¹, respectivamente. Além disso, o APSIM-*Wheat*, para o cálculo desse parâmetro, utiliza fatores de estresse por temperatura e déficit hídrico. Ambos foram adotados e modificados para o azevém anual, como apresentado na Figura 6. O fator temperatura adotado apresentou os mesmos valores empregados no cálculo da fotossíntese do submodelo de folha.

Outros coeficientes e parâmetros presentes em cada submodelo de cada órgão estão apresentado em forma de tabela nos Apêndices A ao E.

Figura 6. Fatores de estresse para cálculo da velocidade potencial de crescimento da raiz: a. Fator de temperatura e b. Fator hídrico, para o modelo APSIM-*Annual Ryegrass*.

Os parâmetros de água no solo foram calibrados a partir de observações de outros modelos (Aveia, Cevada e Trigo) e do AgPasture, além das condições presentes no solo da área de estudo. Esses estão apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 8. Parâmetros do modelo APSIM-*SoilWat* e seus valores padrão e ajustados para a simulação do azevém em comparação a outros modelos.

Descrição	Valores		
	Calibrado para azevém anual cv. BRS Ponteio	Modelos de Aveia Cevada e Trigo	Modelo AgPasture
Data de início no verão para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	1-Out	1-Nov	1-Nov
Acumulado de evaporação de água no solo ao chegar ao final do estágio 1 de evaporação no verão (a.k.a. U) (mm)	4	5	6
Coefficiente de drenagem para o estágio 2 da evaporação da água no solo no verão (a.k.a. ConA)	2	5	3.5
Data de início no inverno para adoção dos parâmetros de evaporação da água do solo (dia-mês)	1-Abr	1-Abr	1-Abr
Acumulado de evaporação de água no solo ao chegar ao final do estágio 1 de evaporação no inverno (a.k.a. U). (mm)	2	5	2
Coefficiente de drenagem para o estágio 2 da evaporação da água no solo no inverno (a.k.a. ConA)	1,5	2	2
Constante de difusividade de água no solo ($\text{mm}^2 \text{day}^{-1}$)	40	40	88
Efeito da umidade do solo acima do ponto de murcha permanente sobre a difusividade da água no solo ($1/\text{mm}^{-1}$)	16	16	35
Fração da radiação recebida refletida do solo descoberto (albedo em solo nu)	0,13	0,12	0,13
Número da curva de escoamento (CN) para solo nu com umidade média	85	73	73
Máxima redução da curva de escoamento devido a cobertura	20	20	20
Cobertura para máxima redução da curva	0,8	0,8	0,8

Para definição da fração de extração de água pela planta do azevém anual (Tabela 9), adotou-se o KL para a camada inicial do solo (0 a 0,20m), igual ao modelo de cevada e tritcale, após isso, os valores adotados foram decrescentes, e então as respostas foram comparando-se com a umidade do solo para cada camada específica.

Tabela 9. Fração de extração de água pela planta (azevém anual) por dia para cada camada de solo (KL Annual Ryegrass) em comparação aos valores de KL para outras culturas presentes no protocolo de solo (DALGLIESH et al., 2016).

Fonte	Cultura	Profundidade do solo (m)									
		0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Valores do protocolo 'APsoil'	Trigo	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Aveia	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Cevada	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
	Triticale	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,04	0,04	0,02	0,02
Calibração para azevém anual		0,07	0,07	0,06	0,06	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01

4.3.3. Avaliação da simulação

Foram avaliadas as variáveis das plantas: biomassa total, biomassa viva, massa de folha e colmo, massa de material morto, massa de inflorescência (espiga + grãos), índice de área foliar (LAI), área foliar específica (SLA) e

altura. Dentre essas variáveis, as que apresentaram resultados mais precisos e com maior eficiência de modelagem estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Análise estatística entre valores observados (O) e estimados (E) das variáveis do azevém anual do APSIM-*Annual Ryegrass*, para os Experimentos 1 e 2, realizados nos anos de 2018 e 2019, considerando os dois sistemas: Irrigado e Sequeiro em Piracicaba/SP. Média da série de dados O e E; índice de concordância (d), coeficiente de determinação (R^2), índice de confiança (c), erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (RMSE) e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

Variável	Média		d	R^2	c	ME	MAE	RMSE	NSE
	O	E							
Massa total (g m^{-2})	145,55	124,47	0,94	0,85	0,87	-21,08	41,51	54,24	0,82
Biomassa viva (g m^{-2})	113,87	115,79	0,95	0,83	0,87	1,92	32,43	46,80	0,83
Massa de folha (g m^{-2})	48,49	50,12	0,94	0,78	0,83	1,63	17,39	26,15	0,77
Massa de Colmo (g m^{-2})	55,75	53,63	0,95	0,85	0,88	-2,12	16,34	23,31	0,84
Inflorescência (g m^{-2})	9,63	12,04	0,88	0,62	0,69	2,41	6,71	12,67	0,58
SLA* ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	0,021	0,021	0,82	0,62	0,65	$2,29 \cdot 10^{-3}$	0,01	0,01	0,57
Altura da folha (m)	0,232	0,259	0,89	0,67	0,73	0,027	0,061	0,079	0,58

*Área foliar específica (SLA)

Pela análise dos dados em conjunto, para ambos os sistemas e ambos os experimentos, o modelo foi eficiente em simular massa total, Biomassa viva e massa de colmo com R^2 acima de 0,80, coeficiente 'd' acima de 0,94 e coeficiente 'c' acima de 0,85, o que classifica o desempenho como "ótimo". A massa de folha também apresentou resultados satisfatórios com eficiência de modelagem de 0,77. As outras variáveis testadas, não presentes na Tabela 10, LAI e massa de material morto apresentaram coeficiente de modelagem negativo (dados não apresentados).

A série de dados observados e estimados em cada um dos experimentos estão apresentados na Figura 7 para biomassa viva, Figura 8 para massa de folha viva, e Figura 9 para massa de colmo. Observa-se que a biomassa viva (Figura 7) no primeiro ano, cresce do primeiro ao terceiro ciclo e depois diminui até a sua senescência no sistema Irrigado, o qual apresenta altas produções de forragem, o mesmo acontece para o segundo ano.

Quanto à análise de erros, a massa total apresentou um RMSE de aproximadamente 54 g m^{-2} ou 542 kg ha^{-1} e subestimativa (erro médio negativo), o que é uma consequência da simulação ineficiente da variável massa de material morto, principalmente no segundo ano de experimento, e da subestimativa da massa de colmo nos ciclos de maior produção (Figura 7), também no Experimento 2.

As simulações de massa de inflorescência, SLA e altura apresentaram pior performance em relação às demais, com eficiência de modelagem entre 0,57 e 0,58 e R^2 entre 0,62 e 0,67. A estimativa de altura apresentou erro médio de 2,7 cm e RMSE de 7,9 cm.

Figura 7. Série de dados observados em campo e estimados da Biomassa viva (g m^{-2}) do azevém anual em sistema Irrigado e Sequeiro nos experimentos 1 (2018) e 2 (2019), conduzidos em Piracicaba/SP.

Figura 8. Série de dados observados em campo e estimados da massa de folha (g m^{-2}) viva do azevém anual em sistema Irrigado e Sequeiro nos experimentos 1 (2018) e 2 (2019), conduzidos em Piracicaba/SP.

Figura 9. Série de dados observados em campo e estimados da Massa de colmo do azevém anual em sistema Irrigado e Sequeiro nos experimentos 1 (2018) e 2 (2019), conduzidos em Piracicaba/SP.

A fim de classificar o comportamento separado da simulação no sistema Irrigado para o de Sequeiro, a Figura 10 demonstra a relação entre os dados observados e estimados da biomassa viva do azevém anual em cada sistema de manejo. As simulações apresentaram-se mais precisas e exatas para o sistema irrigado em relação ao sequeiro. Porém no sequeiro o erro (RMSE) é menor, pois a amplitude dos valores explorados pelo sistema em sequeiro, devido à baixa produção, é menor, sendo quase a metade em relação ao sistema irrigado, também os dados em sistema irrigado são mais dispersos (Figura 10). As demais variáveis apresentam comportamento semelhante em relação à amplitude de exploração os dados e maior precisão do sistema irrigado.

Figura 10. Correlações entre os dados observados e estimados do azevém anual BRS Ponteio para os tratamentos irrigado e sequeiro, em Piracicaba/SP.

Os resultados da avaliação da umidade do solo por profundidade a cada 0,10 m do solo e por camada (0 a 0,30m, 0,30 a 0,70 m e 0a 0,70 m) estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Análise estatística entre valores observados (O) e estimados (E) pelo modelo APSIM-*SoiWat*, para os Experimentos 1 e 2, realizados nos anos de 2018 e 2019, em Piracicaba/SP. Média da série de dados O e E; índice de concordância (d), coeficiente de determinação (R^2), índice de confiança (c), erro médio (ME), erro absoluto médio (MAE), erro quadrático médio (RMSE) e eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE).

Profundidade	Média O	Média E	d	R^2	c	ME	MAE	RMSE	NSE
0 - 0,10 m	32,17	31,37	0,83	0,52	0,60	-0,84	3,24	3,74	0,25
0,10 - 0,20 m	32,95	33,39	0,91	0,72	0,77	0,47	1,61	2,19	0,67
0,20 - 0,30 m	30,21	30,04	0,94	0,80	0,84	-0,24	0,78	1,05	0,76
0,30 - 0,40 m	35,34	34,60	0,80	0,47	0,55	-0,84	1,34	1,82	0,15
0,40 - 0,50 m	35,95	35,73	0,65	0,18	0,28	-0,22	0,88	1,15	-0,86
0,50 - 0,60 m	36,52	35,97	0,74	0,43	0,48	-0,63	1,11	1,45	-0,48
0,60 - 0,70 m	35,93	35,64	0,75	0,40	0,47	-0,33	0,54	0,82	-0,31
0 - 0,30 m	95,27	94,80	0,94	0,78	0,83	-0,71	4,24	5,09	0,73
0,30 - 0,70 m	143,66	141,72	0,87	0,56	0,65	-1,94	2,87	4,27	-0,17
0 - 0,70 m	238,94	236,75	0,93	0,80	0,83	-2,65	5,81	7,39	0,68

A simulação de água no solo mostrou-se com maior precisão para as camadas mais superficiais em relação às em profundidade. Isso explica-se pelo fato de que o azevém apresenta raízes superficiais. Durante o experimento 2, foram coletados em três períodos, amostras de raízes, e se observou, em média, que 90% das raízes estão concentradas até a profundidade de 0,30 m (Figura 11), na qual houve maior extração da água aplicada no sistema irrigado e melhor resposta frente ao balanço de entradas e saídas de água no solo, como pode ser observado nos resultados do sistema em sequeiro (Figura 12 a.).

Figura 11. Massa de seca de raiz por profundidade coletada no Experimento 2, ano de 2019, data das coletas: 25/07/2019 (coleta 1), 22/08/2019 (coleta 2) e 22/08/2019 (coleta 3) em Piracicaba/SP.

O modelo simulou a umidade do solo abaixo do observado para as camadas abaixo de 0,30 m a 0,70 m (Figura 12.b), estimando uma maior secagem do solo nas camadas profundas em relação à observada no campo, principalmente no primeiro ano de cultivo.

a. 0 a 0,30 m • Obs_Irigado — Est_Irigado • Obs_Sequeiro — Est_Sequeiro

b. 0,3 a 0,70 m • Obs_Irigado — Est_Irigado • Obs_Sequeiro — Est_Sequeiro

Figura 12. Série de dados do conteúdo de água no solo observados em campo e estimados pelo modelo APSIM nas camadas: a.0 a 0,30 m e b.0,30 a 0,70 para os Experimentos 1 e 2 irrigado e em sequeiro, conduzidos nos anos de 2018 e 2019, no período de intervalo entre os experimentos não foram coletados dados a campo, Piracicaba/SP.

4.4. Discussão

Por meio desse trabalho foi possível estruturar e agrupar parâmetros de importância para o modelo da cultura do azevém anual e possibilitar uma primeira aproximação da calibração desses parâmetros. Dentre os parâmetros com importância, estão a fração de partição para biomassa estrutural (Figura 4) e a taxa de senescência de cada órgão (Tabela 6), as temperaturas cardiais, parâmetros da fotossíntese, fatores de estresses hídrico e por temperatura e cálculo da área foliar específica (Tabela 7). Esses são frequentemente selecionados e encontrados em outros trabalhos de calibração de modelos para novas culturas (LARA et al., 2012; ANDRADE et al., 2016; BOSI et al., 2020).

Além desses parâmetros, também foi possível calibrar uma relação entre biomassa viva e altura do dossel (até a última folha expandida) apresentando precisão com R^2 igual a 0,67, exatidão com o coeficiente 'd' de 0,89 e NSE 0,58 e um coeficiente 'c' bom (0,73), Tabela 10.

Ojeda et al. (2016) avaliaram a simulação do azevém anual em diferentes locais na Argentina e Austrália, quanto à estimativa da produtividade, sendo que a precisão variou de 0,15 a 0,93, com eficiência da modelagem de 0,53 a 0,86. A localidade que apresentou os piores resultados apresentava o maior número de dado observados (29), os erros observados foram maiores no primeiro ciclo de cultivo, quando o modelo superestimou o valor da produção, e no quarto ciclo, quando houve subestimativa. No presente trabalho, foi observado que a biomassa viva foi subestimada em quase todas as observações no sistema irrigado (Figura 7).

Pembleton et al. (2013) avaliaram a predição de biomassa pelo APSIM para as culturas de trigo, aveia e azevém, na Austrália. As simulações apresentaram predições com precisão de 0,94, 0,93 e 0,87, respectivamente, e eficiência da modelagem de 0,75, 0,79 e 0,75 respectivamente.

As respostas da avaliação realizada com dados observados em campo, por dois anos, e estimados por meio do modelo APSIM-*Annual Ryegrass* para a cultivar de azevém BRS Ponteio, demonstraram resultados mais precisos e exatos para as variáveis de massa total, massa viva, massa de colmo dentre as variáveis testadas. O sistema com irrigação apresenta melhor precisão e exatidão em relação ao sistema em sequeiro (Figura 10), porém maior erro, porque os dados se apresentarem mais dispersos.

Em relação à avaliação da umidade do solo (Figura 12), observou-se menor precisão da simulação em camadas profundas do solo ($R^2 = 0,56$) no primeiro ano de estudo, isso também pode estar relacionado ao fato de o modelo apresentar variações menores em camadas mais profundas. Ao comparar a série de dados de 0 a 0,30 m e de 0,30 a 0,70 m, observa-se que houve uma entrada de 59,4 mm água por precipitação na data de 03/08/2018, a qual proporcionou um aumento dos valores observados da umidade do solo, em ambas as camadas, porém, a estimativa pelo modelo não considerou essa entrada nas camadas de 0,30 a 0,70 m. Além disso, as coletas de raízes (Figura 11) realizadas de 0 a 0,70 m, mostraram a maior massa até a profundidade de 0,30 m.

A partir dos dois experimentos realizados, observou-se a diferença do azevém anual em relação a outras espécies inverniais, como no caso da aveia preta, pois o azevém apresenta o florescimento precoce, irregular e constante ao longo dos ciclos, isso foi considerado um dos principais entraves na calibração de um novo modelo. O teste com outros modelos de culturas semelhantes (APSIM-*Barley*, APSIM-*Wheat* APSIM-*Oats*) mostrou que estes não se adequaram em relação às fases fenológicas necessárias para o azevém. Baseado nessas observações, foi estruturada uma nova escala fenológica (Figura 3), pois não foram encontradas referências na literatura.

No presente trabalho o valor de RUE calibrado foi de 2,2 g MJ⁻¹. Os valores da RUE presentes na literatura variam por espécie e local, alguns estudos relatam para a *Miscanthus* spp valores variando de 1,3 a 4,1 g MJ⁻¹ (HEATON; DOHLEMAN; LONG, 2008; KINIRY et al., 2012; OJEDA et al., 2017). Em sistemas de consorcio entre culturas da alfafa, festuca, consorcio de aveia, soja e milho e pastagens perenes, em dois anos de estudo, Ojeda et al. (2018c) observaram valores de RUE variando de 0,22 a 2,8 g MJ⁻¹. Para espécies de forrageiras tropicais encontram-se valores de RUE variando de 1,03 a 2,7 g MJ⁻¹ (PEZZOPANE et al., 2018; GOMES et al., 2020).

A partir da série temporal de crescimento (Figura 7), é possível verificar que o sistema irrigado produziu mais forragem que o sistema em sequeiro, sendo a diferença máxima encontrada entre os sistemas de aproximadamente 1900 kg ha⁻¹ no corte do final de ciclo. Apesar disso, as plantas irrigadas começaram a senescer antes do que as plantas em sequeiro, o que pode indicar um tempo maior de utilização. A senescência final e a morte das plantas podem ocorrer como resultado de sucessivos cortes, onde se há grande retirada de material

(principalmente folha), resultando na diminuição da taxa de aparecimento de folha. Confortin et al. (2013) observaram, para o azevém anual, que em sistema Irrigado (Figura 8), com a aplicação dos cortes à altura de 0,07 m, frequentemente toda a área foliar é retirada. No sistema em sequeiro, pela menor produtividade, observou-se folhas abaixo da altura de corte, o que fez com que a planta permanecesse mais tempo viva, mesmo com baixa produção, o que foi visualizado no campo em ambos os anos avaliados no presente estudo.

O azevém anual possibilita 5 ciclos de crescimento, em média, apresentando produção menor no primeiro corte, maiores nos três centrais e menor no último corte. Isso pode ser observado para várias cultivares do azevém. No último corte, a produção de biomassa do azevém pode variar de 10 a 340 kg ha⁻¹ (MITTELMANN et al., 2010). No presente estudo, o sistema irrigado, no Experimento 1 (6 cortes) e no Experimento 2 (5 cortes) apresentou produtividade do último corte abaixo de 100 kg ha⁻¹ (Figura 7).

A avaliação de apenas uma calibração pode trazer erros embutidos nas estimativas. Por esse motivo, o presente trabalho necessita de replicações experimentais e de novas calibrações para a cultura do azevém. Dessa forma, pode-se elencar estratégias para melhorar o modelo APSIM-*Annual Ryegrass* em trabalhos futuros, como a avaliação experimental de parcelas sem corte e com corte simultaneamente. Isso possibilitará verificar a influência dos cortes sobre a rebrotação e sobre a fenologia da cultura, principalmente se forem feitas avaliações mais detalhadas das plantas ao longo do ciclo de crescimento, como por exemplo, a visualização do meristema apical e a quantificação da sua altura e diferenciação. O dano causado pelo corte e a altura desse corte para plantas forrageiras pode resultar na retirada de meristemas apicais podendo apresentar dois resultados: formação de perfilhos axilares, ou uma menor rebrota e crescimento de colmos estabelecidos posteriormente (CECATO et al., 2000).

Outra necessidade, está na avaliação mais detalhada da massa de raiz ao longo do ciclo de crescimento, sendo que nesse experimento foram caracterizadas as raízes em apenas 3 diferentes datas e essa ao final do ciclo produtivo. Avaliações mais detalhadas desse componente poderão auxiliar na calibração da partição entre a parte aérea e o sistema radicular.

Também é importante considerar em trabalhos futuros a avaliação da interceptação de radiação solar em sistema irrigado e em sequeiro para assim verificar alterações quanto ao coeficiente de extinção, uma vez que nesse experimento essa avaliação só foi realizada em sistema irrigado. Isso permitirá checar se possíveis alterações na arquitetura da planta, em diferentes manejos, podem alterar a interação da radiação solar com o dossel.

Para o azevém anual também será necessário compreender a dinâmica da ressemeadura natural em sistemas onde se utilizam o azevém anual sobressemeado. Barth Neto et al. (2014) demonstraram que, em sistemas estabelecidos há muito tempo, as pastagens de azevém não podem se restabelecer anualmente se a intensidade do pastejo for alta, devido a remoção de todas as inflorescências produzidas. No entanto, sob moderada intensidade de pastejo, o azevém mantém a sua capacidade de se restabelecer anualmente por ressemeadura natural. Portanto, um modelo bem desenvolvido para essa cultura deve levar em conta esse fator. No presente trabalho, não se observou a ressemeadura natural da cultura, pois entre os anos de experimento foram realizadas aplicações de herbicida para controle das plantas invasoras.

Por fim, o modelo APSIM-*Annual Ryegrass* possibilita novos estudos para o azevém anual, uma vez que as previsões de biomassa da cultura do azevém anual apresentaram resultados satisfatórios para uma primeira abordagem em relação ao modelo APSIM-*Weed*, utilizado em alguns trabalhos para o azevém anual, o qual não foi criado com o objetivo de simular azevém anual e crescimento como forragem e sim a competição dele em cultivo de cereais, visto como uma planta invasora (OJEDA et al., 2016).

4.5. Conclusão

O modelo desenvolvido nesse estudo foi eficiente em estimar a biomassa total, a biomassa viva e a massa de folhas do azevém anual. Considera-se essa uma primeira aproximação de estruturação do APSIM-*Annual Ryegrass* para estimativa de parâmetros do azevém anual, destacando que é importante que outros estudos sejam realizados para melhorar esse modelo e parametrizá-lo para diferentes condições de cultivo. Por meio desse estudo, foram visualizados vários aspectos de estudo para o aprimoramento futuro do modelo.

Referências

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, n. 56, p. 300, 1998. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>>.
- ANDRADE, A. S.; SANTOS, P. M.; PEZZOPANE, J. R.M.; *et al.* 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.
- BARTH NETO, A.; SAVIAN, J. V.; SCHONS, R. M. T.; *et al.* Italian ryegrass establishment by self-seeding in integrated crop – livestock systems: Effects of grazing management and crop rotation strategies. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 77–83, 2014.
- BOSI, Cristiam. **Parameterization and evaluation of mechanistic crop models for estimating Urochloa brizantha cv . BRS Piatã productivity under full sun and in silvopastoral system**. University of São Paulo “Luiz de Queiroz” College of Agriculture, 2017.
- BOSI, C.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N. I.; *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, n. March, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102917>>.
- BROWN, H. E.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P. The APSIM Wheat Model. p. 85, 2020. Disponível em: <<https://apsimdev.apsim.info/ApsimX/Releases/2020.12.04.5914/Wheat.pdf>>.
- BROWN, H. E.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P.; *et al.* Plant Modelling Framework: Software for building and running crop models on the APSIM platform. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 385–398, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.005>>.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Valiação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 96–97, 1997.
- CECATO, U.; MACHADO, A. O.; MARTINS, E. N.; *et al.* Avaliação da produção e de algumas características da rebrota de cultivares e acessos de *Panicum maximum* Jacq. sob duas alturas de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 3, p. 660–668, 2000.
- CONFORTIN, A. C. C.; ROCHA, M. G. da; MACHADO, J. M.; *et al.* Diferentes massas de forragem sobre as variáveis morfogênicas e estruturais de azevém anual. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 496–502, 2013.
- COSTA, N. de L.; GIOSTRI, A. F.; OLIVEIRA, R. A. de; *et al.* Estimativa do rendimento potencial de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) através de modelos matemáticos. **Pubvet**, v. 5, n. 9, p. 1–37, 2011.

- CUNHA, R. P. da; PEDROSO, C. E. da S.; MITTELMANN, Andréa; *et al.* Relationship between the morphogenesis of Italian ryegrass cv. “BRS Ponteio” with forage and seed production. **Ciência Rural**, v. 46, n. 1, p. 53–59, 2016.
- DALGLIESH, N.; HOCHMAN, Z.; HUTH, N. I.; *et al.* Field Protocol to APSOIL characterisations.
- DEEN, W.; COUSENS, R.; WARRINGA, J.; *et al.* An evaluation of four crop: Weed competition models using a common data set. **Weed Research**, v. 43, n. 2, p. 116–129, 2003.
- FESSEHAZION, M. K.; ANNANDALE, J. G.; EVERSON, C. S.; *et al.* Evaluating of soil water balance (SWB-Sci) model for water and nitrogen interactions in pasture: Example using annual ryegrass. **Agricultural Water Management**, v. 146, p. 238–248, 2014.
- GOMES, F. J.; BOSI, C.; PEDREIRA, B. C.; *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, n. February, p. 102876, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102876>>.
- HEATON, E. A.; DOHLEMAN, F. G.; LONG, S. P. M. US biofuel goals with less land: The potential of *Miscanthus*. **Global Change Biology**, v. 14, n. 9, p. 2000–2014, 2008.
- JONES, J. W.; ANTLE, John M.; BASSO, B.; *et al.* Toward a new generation of agricultural system data , models , and knowledge products : State of agricultural systems science. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 269–288, 2017.
- KINIRY, J. R.; JOHNSON, M.V.V.; BRUCKERHOFF, S. B.; *et al.* Clash of the Titans: Comparing Productivity via Radiation Use Efficiency for Two Grass Giants of the Biofuel Field. **BioEnergy Research**, v. 5, p. 41–48, 2012.
- KUNRATH, T. R.; CADENAZZI, M.; BRAMBILLA, D. M.; *et al.* Management targets for continuously stocked mixed oat × annual ryegrass pasture in a no-till integrated crop – livestock system. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 71–76, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.09.013>>.
- LARA, M. A. S.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; *et al.* Predicting Growth of *Panicum maximum*: An Adaptation of the CROPGRO–Perennial Forage Model. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 3, p. 600–611, 2012.
- MITTELMANN, A.; MONTARDO, D. P.; CASTRO, C. M.; *et al.* Caracterização agrônômica de populações locais de azevém na Região Sul do Brasil. **Ciência Rural**, v. 40, n. 12, p. 2527–2533, 2010.
- MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 281, n. 980, p. 277–294, 1977.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>>.
- OJEDA, J. J.; CAVIGLIA, O. P.; AGNUSDEI, M. G.; *et al.* Forage yield, water- and solar radiation-productivities of perennial pastures and annual crops sequences in the south-eastern Pampas of Argentina. **Field Crops Research**, v. 221, n. October 2017, p. 19–31, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.010>>.
- OJEDA, J. J.; PEMBLETON, K. G.; CAVIGLIA, O. P.; *et al.* Modelling forage yield and water productivity of continuous crop sequences in the Argentinian Pampas. **European Journal of Agronomy**, v. 92, n. November 2017, p. 84–96, 2018.
- OJEDA, J. J.; PEMBLETON, K. G.; ISLAM, M. R.; *et al.* Evaluation of the agricultural production systems simulator simulating Lucerne and annual ryegrass dry matter yield in the Argentine Pampas and south-eastern Australia. **Agricultural Systems**, v. 143, p. 61–75, 2016.

- OJEDA, J. J.; VOLENEC, Jeffrey J.; BROUDER, S. M.; *et al.* Evaluation of Agricultural Production Systems Simulator as yield predictor of *Panicum virgatum* and *Miscanthus x giganteus* in several US environments. **GCB Bioenergy**, v. 9, n. 4, p. 796–816, 2017.
- OJEDA, J. J.; CAVIGLIAB, O. P.; IRISARRID, J. G. Nicolás; *et al.* Modelling inter-annual variation in dry matter yield and precipitation use efficiency of perennial pastures and annual forage crops sequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 259, n. October 2017, p. 1–10, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.014>>.
- PEMBLETON, K. G.; RAWNSLEY, R. P.; JACOBS, J. L.; *et al.* Evaluating the accuracy of the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) simulating growth, development, and herbage nutritive characteristics of forage crops grown in the south-eastern dairy regions of Australia. **Crop & Pasture Science**, v. 64, p. 147–164, 2013.
- PEREIRA, A. V.; MITTELMANN, A.; LEDO, F. J. da S; *et al.* Comportamento agrônomo de populações de azevém anual (*Lolium multiflorum* L.) para cultivo invernal na região Sudeste. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 567–572, 2008.
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; CRUZ, P. G. da; *et al.* An integrated agrometeorological model to simulate Marandu palisade grass productivity. **Field Crops Research**, v. 224, n. 1 July, p. 13–21, 2018.
- PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M.; BETTIOL, G. M.; *et al.* **Zoneamento de aptidão climática para os capins Marandu e Tanzânia na região Sudeste do Brasil**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2012. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/sites/default/files/principal/publicacao/Documentos108.pdf>>.
- PRUDENTE JUNIOR, A. C.. **Utilização de sonda capacitiva FDR para estimativa do consumo de água e coeficiente de cultura de *Urochloa brizantha* cv Marandu em cultivo solteiro e consorciado**. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2019.
- REYENGA, P. J.; HOWDEN, S. M.; MEINKE, H.; *et al.* Modelling global change impacts on wheat cropping in south-east Queensland, Australia. **Environmental Modelling and Software**, v. 14, n. 4, p. 297–306, 1999.
- SBRISIA, A. F.; DUCHINI, P. G.; ECHEVERRIA, J. R.; *et al.* Animal production on cultivated pasturelands in regions of temperate climate of Latin America. **Archivos Latinoamericanos de Producción Animal**, v. 25(1):2017, n. January, 2017.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; *et al.* Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>>.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo da Folha do APSIM-*Annual Ryegrass*.

Nome	Expressão ou valores
Albedo	0,26
Máxima condutância estomática sob concentração de 350 ppm CO ₂ (m/s)	0,011 m/s
R50	150
Função inicial de peso	Peso Inicial da planta × [Plant].População Peso Inicial da planta = 0,01 (g/planta)
Função FRGR	Mínimo ([Folha].Fotossíntese.FT)
Coeficiente de extinção	0,45
Função de altura	Potencial de altura: X: [BiomassaViva].Wt; Y: Potencial de altura X: 0; 100; 450; Y: 20; 300; 600
Máxima concentração de N	0,02
Mínima concentração de N	0,005
Fator de realocação de N	1
Fator de translocação de N	0
Eficiência de conversão de DM*	1
Tempo de vida da Folha	Potencial × LAIfator Potencial: X: [Fenologia].Estádio; Y: Potencial; X: 0; 8; 8,001; 9; 10; Y: 60; 60; 30; 20; 10 LAIfator: X: [Folha].LAI; Y: LAI fator; X: 0; 7; Y: 1; 1
Tempo para destacamento da folha	20
Fator de translocação de DM*	0
Fotossíntese	RUE = 2.2 X: Temperatura do ar ponderada (°C); Y: Ft X: 0; 10; 25; 35; Y: 0; 1 ;1; 0 Máxima ponderação de temperatura = 0,75 FN X: [Folha].Fn; Y: Fn; X: 0; 1; 1; Y: 0; 1;

	FW X: [Folha].Fw; Y: fw X: 0; 0,8; 1 Y: 0; 0,5; 1
	FVPD X: [Fotossíntese].VPD; Y: FVPD; X: 0; 10; 50 Y: 1; 1; 1
	RadnInt = [Folha].RadIntTot
	FCO2 = C3 (REYENGA et al., 1999)
Fração de morte da planta	0
LAI Mínimo	0,001 m ² /m ²
Coeficiente de extinção de material morto	0,1
Concentração de Carbono	0,4
Taxa de Desenvolvimento da folha	1
Modificador de CO2 pela Condutância estomática	1
Função de Área foliar específica	SLA max x Fator hídrico
	SLA max: X: [Fenologia].Estádio Y: SLAmax;
	X: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; Y: 0; 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,01; 0,007; 0,007
	Fator hídrico: X: [Folha].Fw; Y: Fator hídrico
	X: 0; 0,4; 0,7; 0,9; 1; Y: 0,1; 0,1; 0,5; 1; 1
Demanda de DM	Estrutural = Função de Demanda de DM * Fração Estrutural
	Função de Demanda de DM: X: [Fenologia].Estádio; Y: Fração de partição
	X: 0; 3; 4; 5; 6; 7; 7,001; 8; 8,001; 9; 10; Y: 0,3; 0,3; 0,4; 0,55; 0,55; 0,6; 0,45; 0,35; 0,3; 0,2; 0,2
	Fração Estrutural = 1 g/g
	Metabólico = 0
	Reserva = 0
Demanda de N	Estrutural = [Folha].Conc.MínimaN × [Folha].PotencialdeAlocaçãodeDM.Estrutural
	Metabólico = 0
	Reserva = [Folha].Conc.MáximaN × ([Folha].Viva.Wt + PotencialAlocaçãoWt) - [Folha].Viva.N
Conc.= Concentração, DM = massa de matéria seca	

APÊNDICE B.Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo de Colmo do APSIM-*Annual Ryegrass*.

Nome	Expressão ou valores
Fator de realocação de N	0
Fator de translocação de N	0
Máxima concentração de N	0,012
Mínima concentração de N	0,0018
Demanda de Nitrogênio	1
Função da taxa de destacamento	0,01/dia
Fator de translocação de DM	0
Fator de realocação de DM	0
Eficiência de conversão de DM	1
Função de respiração de manutenção	0
Taxa de senescência	X: [Fenologia].Estádio Y: Taxa de senescência; X: 0; 3; 4; 5; 7; 8; 9; 10; Y: 0; 0; 0,001; 0,003; 0,003; 0,004; 0,005; 0,009
Concentração crítica N	[Colmo].Conc.MínimaN
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural = Função de Demanda de DM * Fração Estrutural Função de Demanda de DM: X: [Fenologia].Estádio; Y: Fração de partição X: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 7,001; 8; 8,001; 10; Y: 0,3; 0,3; 0,35; 0,4; 0,35; 0,25; 0,31; 0,34; 0,49; 0,1; 0,25; 0,25 Fração Estrutural = 1 g/g Metabólico = 0 Reserva = 1 - [Colmo]. DemandaDM.Estrutural. FraçãoEstrutural
Demanda de N	Estrutural = [Colmo].Conc.MínimaN × [Colmo].Potencial de alocação de DM.Estrutural Metabólico = Conc.N Metabólico × [Colmo].Potencial de alocação de DM.Estrutural Conc.N Metabólico = [Colmo].Conc.criticalN - [Colmo].Conc. MínimaN Armazenamento = [Colmo].Conc.MáximaN × ([Colmo].Viva.Wt + PotencialdeAlocaçãoWt) - [Colmo].Viva.N
Peso inicial	Estrutural = 0 Metabólico = 0 Reserva = 0

APÊNDICE C. Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo de Espiga do APSIM-*Annual Ryegrass*.

Nome	Expressão ou valores
Fator de realocação de N	0
Fator de translocação de N	0
Máxima concentração de N	0,025
Mínima concentração de N	0,02
Demanda de Nitrogênio	1
Função da taxa de destacamento	0,01/dia
Fator de translocação de DM	0
Fator de realocação de DM	0
Eficiência de conversão de DM	1
Função de respiração de manutenção	0
Taxa de senescência	X: [Fenologia].Estádio Y: Taxa de senescência; X: 0; 5; 6; 9; 10; Y: 0; 0; 0,001; 0,001; 0,1
Concentração crítica N	[Espiga].Conc.MínimaN
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural = Função de Demanda de DM* Fração Estrutural Função de Demanda de DM: X: [Fenologia].Estádio; Y: Fração de partição X: 0; 5; 6; 7,001; 8; 8,001; 9; 10; Y: 0; 0; 0,02; 0,02; 0,25; 0,1; 0,2; 0,2 Fração Estrutural = 0,5 g/g Metabólico = 0 Armazenamento = 1 - [Espiga].DemandaDM.Estrutural.EstruturalFraction
Demanda de N	Estrutural = [Espiga].Conc.MínimaN × [Espiga].PotencialDMAlocação.Estrutural Metabólico = Conc.NMetabólico × [Espiga].PotencialDMAlocação.Estrutural Conc.N Metabólico = [Espiga]. Conc.criticalN - [Espiga].Conc.MínimaN Armazenamento = [Espiga].Conc.MáximaN × ([Espiga].Viva.Wt + PotencialAlocaçãoWt) - [Espiga].Viva.N
Peso Inicial	Estrutural = 0 Metabólico = 0 Armazenamento = 0

APÊNDICE D. Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo de Grãos do APSIM-*Annual Ryegrass*.

Nome	Expressão ou valores
Fator de realocação de N	0
Fator de translocação de N	0
Máxima concentração de N	0,03
Mínima concentração de N	0,0123
Demanda de Nitrogênio	1
Função da taxa de destacamento	0,01/dia
Função de respiração de manutenção	0
Taxa de senescência	X: [Fenologia].Estádio; Y: Taxa de senescência
	X: 0; 6; 7; 9; 10; Y: 0; 0; 0,001; 0,001; 0,1
Eficiência de conversão de DM	1
Fator de realocação de DM	0
Fator de translocação de DM	0
Concentração crítica N	[Grão].Conc.MínimaN
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural = Função de Demanda de DM * Fração Estrutural
	Função de Demanda de DM: X: [Fenologia].Estádio; Y: Fração de partição
	X: 0; 7; 7,001; 8; 8,001; 10; Y: 0; 0; 0; 0,3; 0,35; 0,35
	Fração Estrutural = 0,5 g/g
	Metabólico = 0
	Armazenamento = 1 - [Grão].DemandaDM.Estrutural.EstruturalFraction
Demanda de N	Estrutural = [Grão].Conc. Mínima de N × [Grão].PotencialdeAlocaçãodeDM.Estrutural
	Metabólico = Conc.NMetabólico × [Grão]. PotencialdeAlocaçãodeDM.Estrutural
	Conc. N Metabólico = [Grão].Conc. crítica de N - [Grão].Conc.MínimaN
	Armazenamento = [Grão].Conc. MáximaN × ([Grão].Viva.Wt + PotencialAlocaçãoWt) - [Grão].Viva.N
Peso Inicial	Estrutural = 0
	Metabólico = 0
	Armazenamento = 0

APÊNDICE E. Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo da raiz do APSIM-*Annual Ryegrass*

Nome	Expressão ou valores
Velocidade de crescimento da raiz	Potencial de crescimento da raiz × Fator Temperatura × Fator Hídrico
	Potencial de crescimento da raiz
	Pré-Emergente = 5 mm/d
	Pré-Reprodutiva = 15 mm/d
	Reprodutiva = 5 mm/d
	Fator de temperatura X: Máxima ponderação da temperatura (°C); Y: Ft
	Máxima ponderação da temperatura = 0,50
	X: 0; 10; 25; 35; Y: 0; 1 ;1; 0
	Fator Hídrico: X; Escala de água no solo; Y: Fator Hídrico
	X: 0; 0,7; 1; Y: 0; 1 ;1
Profundidade máxima da raiz	1000
Tamanho específico da raiz	105 m/g
Fator de translocação de N	0
Máxima concentração de N	0,01
Mínima concentração de N	0,01
Demanda de Nitrogênio	1
Máxima absorção diária de N	6
KL Modificador	1
KNO3	0,3
KNH4	0
Fator de absorção de N	1
Fator de translocação de DM	0
Eficiência de conversão de DM	1
Função de respiração de manutenção	1
Taxa de senescência	X: [Fenologia].Estádio Y: Taxa de senescência;
	X: 0; 3; 4; 8; 9; 10; Y: 0; 0; 0,001; 0,001; 0,1; 0,1
Concentração crítica N	[Raiz].Conc.MínimaN
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural = Função de Demanda de DM* Fração Estrutural

	Função de Demanda de DM: X: [Fenologia].Estádio; Y: Fração de partição
	X: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7,001; 8; 10; Y: 0,4; 0,4; 0,35; 0,3; 0,25; 0,2; 0,12; 0,04; 0,04; 0; 0
	Fração Estrutural = 1 g/g
	Metabólico = 0
	Armazenamento = 1 - [Raiz].DMDemanda.Estrutural. FraçãoEstrutural
Demanda de N	Estrutural = [Raiz].Conc.MínimaN × [Raiz]. PotencialdeAlocaçãoDM.Estrutural
	Metabólico = Conc.NMetabólico × [Raiz].PotencialdeAlocaçãoDM.Estrutural
	Conc. N Metabólico = [Raiz]. Conc.criticalN - [Raiz].Conc.MínimaN
	Armazenamento = [Raiz].MáximaN × ([Raiz].Viva.Wt + PotencialAlocaçãoWt) - [Raiz].Viva.N
Peso Inicial	Estrutural = 0,01 g/planta
	Metabólico = 0
	Armazenamento = 0
Conc.= Concentração, DM = massa de matéria seca	

ANEXOS

ANEXO A.

Nome, expressão e valor para parâmetros do submodelo de folha no APSIM-*Oats*.

Nome	Expressão ou valores
CO ₂ interno	$(163 - \text{Temperatura média}) / (5 - 0,1 * \text{Temperatura média})$
Modificador de CO ₂ pela Condutância estomacal	$\text{FCo2} / \text{Gradiente relativo de CO}_2 = [\text{Folha}].\text{Fotossintese.FCO}_2 / (\text{CO}_2 - [\text{Folha}].\text{CO2internal.Valor}()) / (350 - [\text{Folha}].\text{CO}_2 \text{ Interno.Valor}())$
Parâmetros Cohort	Fator de realocação de N = 1
	Função de respiração de manutenção = 0
	Fator de translocação de N = 0,03
	Fator de realocação de matéria seca (DM) = 1
	Fator de translocação de DM* = 0,8
	Fator de divisão celular
	Fator de estresse hídrico (Fw) X: [Oats].Folha.Fw Y : Fw; X: 0,5; 1 Y: 0,1; 1
	Fator de estresse de Nitrogênio (Fn) X: [Oats].Folha.Fn Y : Fn; X: 0; 0,5; 1 Y: 0,1; 0,1; 1
	Estresse por expansão
	Fator de estresse hídrico X: [Raiz].Fator de tensão de água Y: Fw; X: 0,1; 1; 1,3 Y: 0; 1; 1
	Efeito da temperatura: [Fenologia].Tmédia Y : T efeito; X: 0; 12; 14 Y: 0; 1; 1
	Fator de estresse de Nitrogênio X: [Oats].Folha.Fn Y : Fn; X: 0; 0,5; 1 Y: 0,1; 0,1; 1
	Área Máxima
	Área de Folha = 4000 mm ²
	Fator de idade X: [Fenologia].Estádio Y: Fator de idade; X: 3; 3,45; 4 Y: 0,1; 0,5; 1
Duração do crescimento	Duração do crescimento
	multiplicador = 1.75
	Filocrono = [Estrutura].Filocrono
	Fator de idade X: [Fenologia].Estádio Y: Fator de idade; X: 3; 4; 5 Y: 1; 1; 1
	Duração Lag
Duração da última Folha = Tempo Termal para maturação - [Folha].CohortParâmetros.Duração da senescência	Fator de idade X: [Fenologia].Estádio Y: Fator de idade; X: 3; 3,45; 4 Y: 0,5; 1; 1
	Tempo Termal para maturação = [Fenologia].Reprodução Precoce.Alvo + [Fenologia].Desenvolvimento de grão.Alvo +

	[Fenologia].Enchimento de grão.Alvo + [Fenologia].Maturação.Alvo + [Fenologia].Colheita.Alvo
	Duração da Senescência
	Multiplicador = 6
	Filocrono = [Estrutural].Filocrono
	Máxima concentração de N: X: [Fenologia]. Estádio Y: max N conc; X: 3; 4; 6 Y: 0,08; 0,05; 0,02
	Concentração crítica N= Concentração crítica de N com 350ppm * Fator de CO ₂
	Mínima concentração de N X: [Fenologia].Estádio Y: máxima concentração de N X: 3; 4; 6 Y: 0,001; 0,005; 0,005
	Influência da seca no retardamento da fase Lag: X: [Oats]. Folha. Fw Y: Fator de estresse; X: 0; 0,5 Y: 0,5; 0
	Influência da seca na senescência X: [Oats]. Folha. Fw Y: Fator de estresse; X: 0; 0,5
	Área foliar específica máxima (SLA): X: [Fenologia]. Estádio Y: SLAmax; X: 2; 3; 4 Y: 25000; 30000; 40000
	Área foliar específica (SLA) Mínima X: [Folha].Fn Y: SLAmin X: 0,4; 1 Y: 1000; 18000
	Concentração (N) inicial =0
	Fração estrutural = 0,3
	Fração de reserva = 0
	Parâmetro do tamanho e formato da folha = 0,3
	Tamanho relativo da Senescência da folha = 1 (0-1)
	Influência da sombra na Taxa de senescência
	Efeito de cobertura X: [Folha]. Padrão de cobertura atual Y: efeito de cobertura; X: 0; 0,9; 0,95; 1 Y: 0; 0; 0,01; 0,03
	Tempo Termal=[Fenologia]. Tempo Termal
	Custo de remobilização = 0
	Concentração de Carbono = 0,4
Folhas iniciais	
	EUR = 1,6
	Ft X: 0; 15; 25; 35 Y: 0;1 ;1; 0
Fotossíntese	FN X: [Folha]. Fn Y:Fn X: 0; 1; 1,5 Y: 0; 1; 1
	FW X: [Folha]. Fw Y: Fw X: 0; 0,4; 0,8; 1 Y: 0; 0,2; 1; 1
	FVPD X: [Fotossíntese]. VPD Y: FVPD; X: 0; 10; 40 Y: 1; 1; 0
	RadmInt = [Folha]. RadIntTot
Coeficiente de Extinção	0,45
Fração estrutural	0,5

DM Eficiência de conversão	1
----------------------------	---

*DM – massa de matéria seca

ANEXO B. Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo de colmo do APSIM-*Oats*.

Nome	Expressão ou valores
Taxa de senescência	X: [Fenologia]. Estádio Y: Taxa de senescência; X: 3; 7; 8; 9 Y: 0; 0; 0; 0,2
Máxima concentração de N	X: [Fenologia]. Estádio Y: Conc. máxima N (g/g); X: 3; 4; 4.5; 6 Y: 0,05; 0,04; 0,015; 0,012
Mínima concentração de N	0,0018 (g/g)
Fator de translocação de N	Crescimento vegetativo = 0 Crescimentos reprodutivo = 0,5
Fator de translocação de DM	Crescimento vegetativo = 0 Crescimentos reprodutivo = 0,5
Porcentagem WSC	[Colmo].Vivo.ArmazenadoWt / [].vivo.Wt
Função de peso inicial	0 g/m ²
Função da taxa de destacamento	0 /d
Função de respiração de manutenção	0
Eficiência de conversão de DM	1
Fator de realocação de DM	0
Concentração Crítica de N	[Colmo].Conc.Mínima N
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural Pré-alongamento de Colmo = 0,7 Alongamento de Colmo = 0,8 Emergência reprodutiva = 0,8 Fração estrutural Crescimento Vegetativo = 0,9 Crescimento Reprodutivo = 0,8 Metabólico = 0 Reserva = 1 - [Colmo].DemandaDM.Estrutural.FraçãoEstrutural
Demanda de N	Estrutural = [Colmo].Conc.MínimaN × [Colmo].potencialdealocaçãoodeDM.Estrutural

Metabólico = $\text{Conc. N Metabólico} \times [\text{Colmo}]. \text{ potencial de alocação de DM. Estrutural}$

Reserva = $[\text{Colmo}]. \text{Conc. máxima N} \times ([\text{Colmo}]. \text{vivo. Wt} + \text{Potencial de Alocação. Wt}) - [\text{Colmo}]. \text{Vivo. N}$

Concentração de N metabólico = $[\text{Colmo}]. \text{Concentração crítica de N} - [\text{Colmo}]. \text{Conc. mínima N}$

Conc. = Concentração, *DM – massa de matéria seca

ANEXO C.

Nome; expressão e valor para parâmetros da panícula do submodelo de panícula do APSIM-Oats

Nome	Expressão ou valores
Taxa de senescência	0 /d
Máxima concentração de N	0,025 (g/g)
Mínima concentração de N	0,02 (g/g)
Fator de realocação de N	0
Fator de translocação de N	0,3
Fator de translocação de DM	Crescimento vegetativo = 0 Crescimentos reprodutivo = 0,5
Função de peso inicial	0 g/m ²
Função da taxa de destacamento	0 /d
Função de respiração de manutenção	0
DM Eficiência de conversão	1
Número de cabeças	[Estrutural].PopulaçãoTotaldeColmo x PanículasPorColmo.FValor fixo: 0,83
Fator de realocação de DM	0
Concentração Crítica de N	[Panícula].Conc.MínimaN
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural
	Função de Demanda por DM
	Tempo Termal= [Fenologia].Tempo Termal
	Estresse
	Estresse hídrico X: [Raiz].Fator de tensão da água, X: 0,1; 1; 1.3 Y: 0; 1; 1
	Fator de estresse por temperatura X: [Fenologia].Tmédia X: 0; 12 ;14 Y: 0; 1; 1
	Fator de estresse por nitrogênio X: [Aveia].Folha.Fn X: 0; 0,5; 1 Y: 0,1; 0,1; 1
	Começo do Estádio = 4.8
	Máximo peso do órgão= 0,4 g
	Duração de crescimento
	Reprodução precoce = [Fenologia]. Reprodução precoce.Alvo
	Desenvolvimento do Grão = [Fenologia].DesenvolvimentodoGrão.Alvo

Demanda de N	Fração estrutural = 0;9
	Metabólico = 0
	Reserva = 1 - [Panícula].DMDemands.Estrutural.FraçãoEstrutural
	Estrutural = [Panícula].Conc.MínimaN × [Panícula].potencialDMAlocação.Estrutural
	Metabólica = Conc. N Metabólico × [Panícula].potencialDMAlocação.Estrutural
Reserva = [Panícula].Conc. MáximaN × ([Panícula].Vivo.Wt + potencialAlocaçãoWt) - [Panícula].vivo.N	
Conc.= Concentração, DM = massa de matéria seca	

ANEXO D. Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo de grão do APSIM-*Oats*

Nome	Expressão ou valores
Função	Número do grão = Grãos Por grama de Colmo × [Colmo+Panícula].Wt
	Grãos Por grama de Colmo = 26 (Grãos)
Inicial Proporção do grão	0,05
Inicial Proporção do grão	0,032 (g)
Demanda de DM	
	Função da taxa de enchimento
	Função de número = [Grão].Função de número
Fase Inicial	Duração de enchimento = [Fenologia].Desenvolvimento do Grão.Alvo
	Tempo Termal= [Fenologia].Tempo Termal
	Potencial de incremento no tamanho = [Grão].Proporção Inicial de Grão × [Grão].Tamanho máximo de grão potencial
	Função da taxa de enchimento
	Função de número = [Grão].Função de número
Fase linear	Duração de enchimento = [Fenologia].Desenvolvimento do Grão.Alvo
	Tempo Termal= [Fenologia].Tempo Termal
	Potencial de incremento no tamanho = [Grão].Proporção Inicial de Grão × [Grão].Tamanho máximo de grão potencial
Mínimo Concentração de N	0,0123 (g/g)
Max concentração de N no crescimento diário	0,03 (g/g)
Máxima Concentração de N	0,03 (g/g)
	Enchimento do grão
	Taxa de enchimento
	Função de número = [Grão].Função de número
Taxa de enchimento N	Duração do enchimento= [Fenologia].Desenvolvimento do Grão.Alvo + [Fenologia].Enchimentodogrão.Alvo
	Tempo Termal= [Fenologia].Tempo Termal
	Incremento potencial de tamanho = [Grão].Proporção inicial de Grão × [Grão].Máximo tamanho potencial de grão
Conteúdo de água	0,12 g/g
Tempo termal acumulado	Tempo Termal diário= [Fenologia].Tempo Termal
Proteína	$([Grão].Live.N + [Grão].morto.N)/([Grão].vivo.Wt + [Grão].morto.Wt) * 100 * 5.71$
Eficiência de conversão de DM	1

Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4

ANEXO E.Nome; expressão e valor para parâmetros do submodelo de raiz do APSIM-*Oats*

Nome	Expressão ou valores
KL Modificador	1
Efeito da água no solo	1
Max absorção diária de N	20
Taxa de senescência	0,005
Profundidade máxima da raiz	1000 mm
Máxima Concentração de N	0,01 (g/g)
Mínimo Concentração de N	0,01 (g/g)
KNO ₃	0,02
KNH ₄	0,01
Início DM	0,005 g/planta
Tamanho específico da raiz	105 m/g
Velocidade de crescimento da raiz	Potencial de crescimento da raiz
	Pré-emergência = 5 mm/d
	Pós-Emergência = 20 mm/d
	Fator de temperatura X: 0; 15; 25; 35 Y: 0; 1; 1; 0
Fator de absorção de N	Fator hídrico X: [Escalda da água no solo] Y: fator hídrico
	X: 0; 0,25; 1 Y: 0; 1 ;1
	X: [Escalda da água no solo] Y: fator de absorção de N; X: 0; 1 Y: 0; 1
DM Eficiência de conversão	1
Função de respiração de manutenção	1
Custo de remobilização	0
Concentração de Carbono	0,4
Demanda de DM	Estrutural
	Função de Demanda de DM
	Fração de partição
	Pré emergência = 0
	Pré Florescimento X: [Fenologia]. Estádio Y: Fator de idade X: 3. 4 Y: 0,2; 0,2
	Pós Florescimento = 0,2
	Fração estrutural = 1

	Metabólico = 0
	Armazenamento = 1 - [Colmo].Demanda estrutural de DM.Fração Estrutural
	Estrutural = [Raiz].Conc.Mínima de N × [Raiz].potencialDMAlocação.Estrutural
Demanda de N	Metabólico = Conc.NMetabólico × [Raiz].potencialDMAlocação.Estrutural
	Armazenamento = [Raiz].Conc.Máxima N × ([Raiz].Viva.Wt + potencialAlocaçãoWt) - [Raiz].Viva.N
Conc.= Concentração, DM = massa de matéria seca	