

São Carlos, SP / Dezembro, 2023

Parametrização do modelo APSIM para estimativa da produtividade do consórcio milho-braquiária cultivado para produção de silagem

Cristiam Bosi⁽¹⁾, José Ricardo Pezzopane⁽²⁾, Henrique Bauab Brunetti⁽³⁾, Santiago Viana Cuadra⁽⁴⁾ e Patricia Menezes Santos⁽²⁾

⁽¹⁾ Engenheiro-agrônomo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. ⁽²⁾ Pesquisadores, Embrapa Pecuaría Sudeste, São Carlos, SP. ⁽³⁾ Engenheiro-agrônomo, bolsista, Embrapa Pecuaría Sudeste, São Carlos, SP. ⁽⁴⁾ Pesquisador, Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP.

Resumo – O consórcio milho-braquiária é uma tecnologia em que se cultivam as duas espécies juntas. Tradicionalmente, esse consórcio vinha sendo adotado como uma das principais alternativas de integração lavoura-pecuária e, nos últimos anos, esse modelo também tem sido aplicado para o aumento da produção vegetal e, conseqüentemente, do maior acúmulo de matéria orgânica no solo. O objetivo do trabalho foi adaptar a plataforma APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) para estimar a produtividade do milho e do capim-piatã em cultivo consorciado, por meio da parametrização dos módulos APSIM-*Tropical Pasture* e APSIM-*Maize* e integração simultânea desses módulos para representar as respostas das culturas consorciadas. Para isso, foram realizados três experimentos, na Embrapa Pecuaría Sudeste (São Carlos, SP), nas safras de verão de 2017/2018 e 2021/2022, e de inverno de 2020, em que foram avaliados diferentes manejos das culturas. Nesses experimentos foram analisadas medidas biométricas e fenológicas do capim e do milho, além do monitoramento agrometeorológico. Com base nos dados coletados foram calibrados os módulos APSIM-*Tropical pasture* e APSIM-*Maize* para a estimativa do crescimento do capim-piatã e do milho consorciados. As simulações das culturas consorciadas permitem avaliar o desempenho considerando a competição dessas culturas por recursos, como interceptação da radiação solar, extração da água e do nitrogênio no solo. Os resultados alcançados nas simulações do milho para silagem, consorciado com o capim-piatã, mostraram-se satisfatórios e indicaram que o modelo APSIM tem potencial para a simulação de culturas consorciadas e de sistemas de integração lavoura-pecuária, bem como da competição entre culturas por radiação solar, água e nitrogênio. Sugere-se a melhoria no modelo para a simulação do crescimento do capim no final do ciclo do milho e a realização de estudos para calibrar os modelos para a simulação do capim após o corte do milho para silagem.

Termos para indexação: modelagem, integração lavoura-pecuária, biomassa.

Embrapa Pecuaría Sudeste

Rod. Wasghinton Luiz, Km 234
CEP 13560-970, São Carlos, SP
Fone: (16) 3411-5600
www.embrapa.br/pecuaría-sudeste
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

André Luis Monteiro Novo

Secretário-executivo

Luiz Francisco Zafalon

Membros

Gisele Rosso, Mara Angélica

Pedrochi, Maria Cristina

Campanelli Brito e Sílvia Helena

Picirillo Sanchez

Revisão de texto

Gisele Rosso

Normalização bibliográfica

Mara Angélica Pedrochi (CRB-
8/6556)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Maria Cristina Campanelli Brito

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
reservados à Embrapa.

Parameterization of the APSIM model to estimate the yield of maize-palisadegrass mixed cropping cultivated for silage

Abstract – The maize-palisadegrass mixed cropping is a technology in which the two species are cultivated together. Traditionally, this system was adopted as one of the main types of crop-livestock integration system, and in the more recent years, it have been employed to increase productivity and soil organic matter. The aim of this study was to adapt the APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*) platform to estimate the yield of Maize and Piatã palisadegrass, through the parameterization of the APSIM-Tropical Pasture and APSIM-Maize modules, and the combination of them to represent the crop responses in a mixed cropping. For this, three experiments were conducted at Embrapa Southeast Livestock (São Carlos, SP, Brazil), in the 2017/2018 and 2021/2022 summer crop, and in the 2020 winter crop, in which were assessed different crop managements. In these experiments were measured plant biometric and physiological characteristics and agrometeorological variables. Based on the collected data, the modules APSIM-Tropical Pasture and APSIM-Maize were calibrated to estimate the productivity of Piatã palisadegrass and maize mixed cropping. Simulations of mixed cropping allow to assess crop performance, considering the competition between them for resources, such as solar radiation interception, and soil water and nitrogen uptake. The results obtained from the simulations of maize for silage and Piatã palisadegrass were satisfactory and indicated that the APSIM model was able to simulate mixed cropping and crop-livestock integration, as well as the competition between crops for solar radiation, water, and nitrogen. Model improvements are suggested aiming to simulate better grass growth at the end of maize cycle, such as to calibrate the model for simulations of grass after cutting maize for silage.

Index terms: modelling, integrated crop-livestock system, biomass.

Introdução

O Brasil possui o maior rebanho bovino comercial do mundo, com mais de 190 milhões de cabeças, além de ser o principal exportador de carne bovina (ABIEC, 2023). Porém, o setor pecuário enfrenta vários desafios como, por exemplo, a degradação de

pastagens. Esta provoca a compactação e a falta de aeração dos solos, diminuição na infiltração de água e aumento na possibilidade de emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o solo descoberto favorece o aumento da amplitude térmica, que acelera ainda mais o processo de degradação (Primavesi, 2007). Em áreas degradadas, a produtividade e a qualidade dos pastos são baixas, comprometendo o retorno econômico da atividade, por meio da diminuição da produtividade animal e de menores taxas de desfrute, além de provocar malefícios ambientais, como diminuição dos aportes de carbono no solo e maiores emissões de metano por unidade de carne produzida.

Nesse contexto, a intensificação das pastagens surge como uma alternativa para reduzir o problema e aumentar a eficiência de utilização da terra e dos recursos disponíveis. Uma das alternativas para intensificação está relacionada à integração lavoura-pecuária (Dias Filho, 2017).

Existem vários sistemas de integração lavoura-pecuária, modulados de acordo com o perfil e os objetivos da fazenda. Essas diferenças devem-se às peculiaridades regionais e da fazenda, como: condições de clima e de solo, infraestrutura, experiência do produtor e tecnologia disponível. Atualmente, três modalidades de integração lavoura-pecuária destacam-se: a) fazendas de pecuária em que a introdução de culturas de grãos em áreas de pastagens tem por objetivo recuperar a produtividade dos pastos; b) fazendas especializadas em lavouras de grãos que adotam as gramíneas forrageiras para melhorar a cobertura de solo para o sistema de plantio direto e, na entressafra, há oportunidade para uso dessa forragem na alimentação dos bovinos; e c) fazendas que, sistematicamente, adotam a rotação de pasto e lavoura para intensificar o uso da terra e beneficiar-se do sinergismo entre as duas atividades (Macedo, 2009).

Mais especificamente, o consórcio milho-braquiária é uma tecnologia em que se cultivam as duas espécies juntas, tendo como objetivo a produção de silagem ou grãos e palha de milho e palha ou pasto de braquiária, com inegáveis benefícios à sustentabilidade da produção, principalmente, quando considerada a imprevisibilidade climática, típica da atividade agrícola (Ceccon; Borghi; Crusciol, 2013).

Integrar milho com braquiária é uma prática agrícola que pode ser usada em diferentes sistemas de produção para minimizar os problemas relacionados ao solo, por meio da sua cobertura com plantas, para melhorar sua capacidade produtiva e, também, para o estabelecimento de

pastagens. O consórcio de milho com forrageira tem como objetivos a produção de palha para cobertura do solo e a produção de forragem para alimentação de animais. A diferença entre um e outro objetivo consiste basicamente na população e distribuição de plantas da forrageira: maiores populações são usadas para a formação de pasto e, menores, para a produção de palha (Ceccon; Borghi; Crusciol, 2013).

Para cultivares do gênero *Urochloa*, existem na literatura diversas parametrizações de modelos mecanísticos com o objetivo de estimar a produtividade (Giraldo et al., 1998; Pedreira et al., 2011; Pequeno et al., 2017; Santos et al., 2019; Bosi et al., 2020b; Bosi et al., 2020a; Gomes et al., 2020; Souza et al., 2022). A modelagem do cultivo de milho também vem sendo desenvolvida, inclusive, com modelos mais robustos e que permitem uma avaliação mais detalhada das características produtivas e de manejo dessa cultura em relação aos modelos para pastagens. Como exemplo dessas aplicações, podem ser elencados os trabalhos de Vučetić (2011) e Ngwira; Aune; Thierfelder (2014) com o DSSAT-CERES-Maize, e os de Tong et al. (2016), Magaia et al. (2017) e Smethurst et al. (2017) com o APSIM-Maize. Por outro lado, a modelagem do crescimento e desenvolvimento de culturas em consórcio ainda é incipiente, principalmente, considerando sistemas de integração lavoura-pecuária.

O *Agricultural Production Systems Simulator* (APSIM) é uma plataforma de simulação de culturas agrícolas, pastagens e árvores capaz de simular mais de 30 espécies de plantas (Holzworth et al., 2014). Em sua versão mais recente, chamada *APSIM-Next Generation*, foi construído um módulo para pastagens tropicais, o *APSIM-Tropical Pasture* (Bosi et al., 2020a). Esse módulo foi desenvolvido na *APSIM-Plant Modelling Framework*, descrita por Brown et al. (2014). A equação principal do modelo *APSIM-Tropical Pasture* é:

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

em que:

G é a taxa de crescimento diária da pastagem ($g\ m^{-2}$); RUE é a eficiência de uso da radiação de planta inteira ($g\ MJ^{-1}$), que representa a razão entre acúmulo de massa seca (parte aérea + raiz) e radiação solar global interceptada (MJ); RI é a interceptação de radiação solar global, calculada por meio da lei de Beer [$I = I_0 \times (1 - e^{-k \times LAI})$], utilizando-se o índice de área foliar (LAI), calculado pelo modelo, e o coeficiente de extinção (k) fornecido pelo usuário; Ft é o fator de temperatura,

determinado pelas temperaturas cardinais: temperatura base inferior (Tb), primeira temperatura ótima (TO1), segunda temperatura ótima (TO2) e temperatura base superior (TB); Fn é o fator de nitrogênio, determinado por uma interpolação linear entre o valor mínimo e o ótimo de concentração de N na folha; Fvpd é o fator de déficit de pressão de vapor (DPV), que funciona de forma similar ao Fn e considera uma interpolação linear entre o DPV que promove a supressão total da fotossíntese ao DPV ótimo; Ft, Fn e Fvpd são regulados por uma função de mínimo, que impõe a lei do mínimo de Liebig, isso significa que somente o fator mais limitante é usado nos cálculos do crescimento da pastagem. Fw é o fator de déficit hídrico, determinado pela relação entre demanda de água pela planta e suprimento de água, que pode ser reduzido ou intensificado dependendo da espécie ou cultivar. FCO₂ é o fator que calcula o impacto do CO₂ na RUE utilizando a abordagem de Reyenga et al. (1999).

Esse modelo considera quatro submodelos relacionados aos quatro órgãos da planta (folha, colmo, raiz e órgão de reserva). O submodelo folha calcula a área foliar específica, o índice de área foliar, a RI e a fotossíntese, que vai produzir a matéria seca a ser particionada entre os órgãos. Adicionalmente, esse submodelo possui uma função *leaf kill* para geadas, regulada pela temperatura mínima diária; uma ferramenta para inserir as frações de matéria seca (MS) e N que são não-estruturais e que podem ser realocadas dentro da planta durante a senescência; e os cálculos de senescência da folha e *leaf detachment* (tempo para a folha morta ser perdida para a matéria orgânica do solo). Os submodelos colmo, raiz e órgão de reserva possuem a opção de inserir parte da MS e do N como não-estrutural, realocação e os seus cálculos de senescência e *detachment*, tal como no submodelo folha, e possuem demanda de N para assimilar a MS destinada a eles durante a partição. Os submodelos raiz e órgão de reserva possuem uma ferramenta que permite a realocação da MS e do N, ou seja, esses órgãos podem funcionar como órgãos de reserva e enviar parte da sua MS e N não-estruturais para outros órgãos. O submodelo órgão de reserva descreve a coroa, mas pode considerar estolão ou rizoma para espécies que possuem esses órgãos.

Adicionalmente, o *APSIM-Tropical Pasture* possui uma ferramenta para o manejo do corte (*cutting management*), que permite inserir a massa de folha e de colmo residuais após um evento de corte ou de pastejo; funções para calcular a partição e a senescência baseadas em vários fatores, tais

como idade da planta, fotoperíodo, entre outros; e cálculos da área foliar específica que levam em conta o déficit hídrico e os efeitos do sombreamento.

O modelo APSIM-Maize (Brown et al., 2015) também foi desenvolvido na APSIM-Plant Modelling Framework de Brown et al. (2014). Esse modelo é composto pelos módulos: Arbitrator, que é responsável pela alocação de MS e N em cada órgão da planta e permite a divisão dessa matéria seca em estrutural, metabólica e de reserva; *Phenology*, que simula o desenvolvimento da planta por sucessivas fases fenológicas (germinação, emergência, período juvenil, período fotossensível, aparecimento de folhas, folha bandeira-florescimento, florescimento-enchimento de grãos, enchimento de grãos, maturação e maturação-colheita); *Structure*, que calcula o desenvolvimento estrutural da planta, incluindo o número de primórdios, folhas, colmos e nós, bem como sua altura; *Grain*, que usa um modelo genérico para os componentes reprodutivos da planta e calcula a produtividade levando em conta o número de grãos e o seu tamanho; *Root*, que calcula o crescimento das raízes em termos de profundidade, acúmulo de biomassa e subsequente densidade de comprimento das raízes, e possui funções para cálculo da demanda de matéria seca e N, absorção de N e água, etc.; *Leaf*, que é um modelo genérico para folha e calcula o tamanho das folhas, o efeito do estresse hídrico na divisão de células e na expansão das folhas, a fotossíntese, entre outros; *Husk*, que simula o acúmulo de matéria seca na palha da espiga; *Rachis*, que simula o crescimento da ráquis; *Stem*, que simula o crescimento do colmo; e os módulos de cálculo da matéria seca viva ou morta de cada órgão, da parte aérea e do sistema radicular, ou da própria planta (Brown et al., 2015).

O APSIM possui uma estrutura de modelagem modular que permite a inclusão de várias culturas em uma mesma simulação. Dessa forma, elas podem competir automaticamente pelos recursos disponíveis no solo e, com algumas adaptações de *scripts*, competir pela interceptação de radiação solar.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi parametrizar o modelo APSIM para simular o crescimento e o desenvolvimento de híbridos de milho com aptidão para silagem, utilizar essas parametrizações com a parametrização de Bosi et al. (2020a) para o capim-piatã e desenvolver a simulação de sistemas consorciados de milho e braquiária para produção de silagem

Material e métodos

Experimentos de campo

Caracterização da área experimental: Os experimentos foram conduzidos na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos (SP) (21°57'42" S, 47°50'28" W, 860 m de altitude). O clima local é classificado como Cwa (Köppen), com duas estações bem definidas: estação seca, de abril a setembro, com temperatura média de 19,9 °C e 250 mm de chuva, e estação chuvosa, de outubro a março, com temperatura média anual de 23,0 °C e 1.100 mm de chuva (Alvares et al., 2013). O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Distrófico (Santos et al., 2006).

Experimento 1: O primeiro experimento foi semeado em 28 de novembro de 2017 em sistema de semeadura direta, formando 1 ha do consórcio entre milho (híbrido LG 6030 PRO2) e capim-piatã (*Urochloa* (syn. *Brachiaria*) *brizantha* (Hochst ex A. Rich.) Stapf cv. BRS Piatã), cultivado em sistema de sequeiro e no período recomendado pelo zoneamento para o cultivo de ambas as culturas, sendo que a precipitação no período foi de 695 mm. A densidade de semeadura do milho foi de 6 plantas por metro quadrado, enquanto que a do capim-piatã foi de 10 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis. A adubação utilizada foi de 500 kg ha⁻¹ da formulação 08-28-16 na semeadura e 600 kg ha⁻¹ de 20-05-20 em cobertura, 21 dias após a semeadura. A colheita do milho para silagem foi realizada em 15 de março de 2018, quando as plantas de milho estavam com aproximadamente 30% de matéria seca.

Experimento 2: Foi semeado em 5 de maio de 2020 em sistema de semeadura direta, formando 1.200 m² do consórcio entre milho (híbrido BM 855 PRO2) e capim-piatã, cultivado em sistema irrigado com pivô central e fora do período recomendado para a safra. A densidade de semeadura do milho foi de 5,6 plantas por metro quadrado, enquanto a do capim-piatã foi de 10 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis. A adubação utilizada foi de 350 kg ha⁻¹ da formulação 08-28-16 na semeadura e 330 kg ha⁻¹ de 20-05-20 em cobertura, 50 dias após a semeadura. A precipitação nesse período foi de 70 mm e a lâmina de irrigação aplicada de 226 mm. A colheita do milho para silagem foi realizada em 14 de setembro de 2020, quando as plantas estavam com aproximadamente 30% de matéria seca.

Experimento 3: Foi semeado em 16 de novembro de 2021 em sistema de semeadura convencional, formando 1.200 m² do consórcio entre milho (híbrido AG 8061 PRO2) e capim-piatã, 1.800 m² do milho em monocultura e 600 m² do capim-piatã em monocultura. Esse experimento foi cultivado em sistema irrigado com pivô central e no período recomendado para a safra. A densidade de semeadura do milho foi de 5 plantas por metro quadrado, enquanto que a do capim-piatã foi de 10 kg ha⁻¹ de sementes puras viáveis. A adubação utilizada foi de 500 kg ha⁻¹ da formulação 08-28-16 na semeadura e 600 kg ha⁻¹ de 20-05-20 em cobertura, 30 dias após a semeadura. A precipitação no período foi de 966 mm e a lâmina de irrigação aplicada de 68 mm. A colheita do milho e do capim-piatã para silagem foi realizada em 17 de março de 2022, quando as plantas de milho estavam com aproximadamente 30% de matéria seca.

Na Figura 1 são apresentadas fotos da evolução do consórcio no Experimento 3.

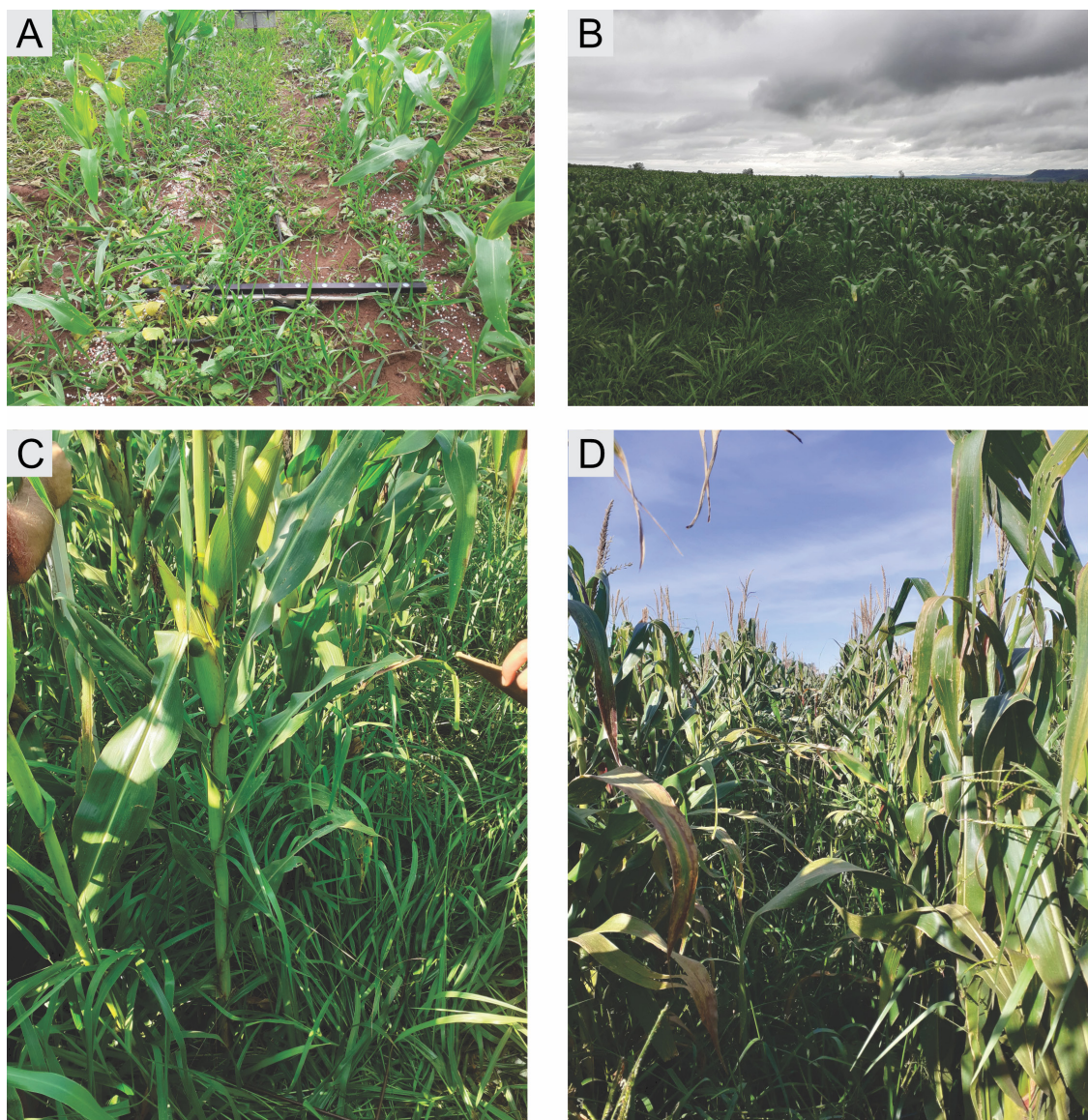


Figura 1. Fotos da área experimental do experimento 3, do consórcio milho-braquiária aos 30 dias após a semeadura - DAS (16/12/2021) (A), aos 48 DAS (3/1/2022) (B), aos 92 DAS (16/2/2022) (C) e aos 107 DAS (3/3/2022) (D), em São Carlos, SP.

Coleta de dados biométricos: Essas coletas foram iniciadas aproximadamente 30 dias após a emergência do milho para todos os experimentos. Depois realizaram-se as coletas a cada 14 dias até o final do ciclo do milho. Foi utilizada uma moldura com comprimento de 1 m e com largura de 1,6 m, dessa forma a moldura comportou duas linhas de milho e um metro linear para cada linha, além de plantas de braquiária nas linhas de milho e das entrelinhas. O posicionamento da moldura foi com suas bordas laterais localizadas exatamente no meio de duas entrelinhas de milho. Foi medida a altura de cinco plantas representativas de milho e de braquiária, em cinco pontos dentro da moldura e procedeu-se a contagem de plantas de milho e braquiária (apenas na primeira coleta dos experimentos, para a braquiária) dentro da moldura. Ao final da avaliação, foram cortadas todas as plantas dentro da moldura. Para as amostras de milho, o procedimento foi cortar todas as plantas ao nível do solo, coletando também as folhas mortas que já estavam soltas da planta; pesar todas as plantas cortadas dentro da moldura em conjunto; depois selecionar de duas a cinco plantas representativas para a determinação da porcentagem de matéria seca, pesar essas plantas frescas, picá-las e colocá-las em sacos de papel para secagem em estufa. Após a secagem, as amostras foram pesadas. Foram selecionadas também de duas a cinco plantas representativas para serem levadas à bancada, onde foi feita a separação morfológica de folha, colmo + pendão, folha morta, colmo morto e espiga. As folhas verdes foram passadas no integrador de área foliar para determinação da área foliar e posterior cálculo do índice de área foliar. As amostras de colmos e folhas vivos e mortos foram picadas e colocadas em sacos de papel para determinação da matéria seca. As espigas, quando presentes, foram colocadas inteiras para secar. Depois de secas, foi feita a separação entre palha, ráquis e grãos, para pesagem separadamente.

Para as amostras de capim-piatã, as plantas foram cortadas ao nível do solo, coletando também as folhas e colmos mortos que já haviam se soltado da planta. Foram pesadas todas as plantas cortadas dentro da moldura, em conjunto. Depois, foi selecionada uma subamostra para determinação da porcentagem de matéria seca, que foi pesada ainda fresca e colocada para secar em estufa. Foi selecionada outra subamostra para ser levada à bancada para separação morfológica de folha (lâmina foliar), colmo (colmo + bainha),

folha morta, colmo morto e inflorescência. As folhas foram passadas em integrador de área foliar para determinação da área foliar e do índice de área foliar. Os componentes foram colocados para secar em estufa a 60 °C até peso constante.

Foi marcada uma fileira com cinco plantas por repetição para monitoramento do número de folhas e florescimento do milho. Essa contagem foi feita uma vez por semana, contando as folhas que estavam com a ponta aparecendo (*leaf tip*) e as folhas com lígula aparente (expandidas). Nas plantas marcadas para contagem de folhas foi observada a emissão da boneca e do pendão para determinar as datas de florescimento masculino e feminino.

Na Figura 2 são apresentadas fotos das coletas experimentais no Experimento 3.

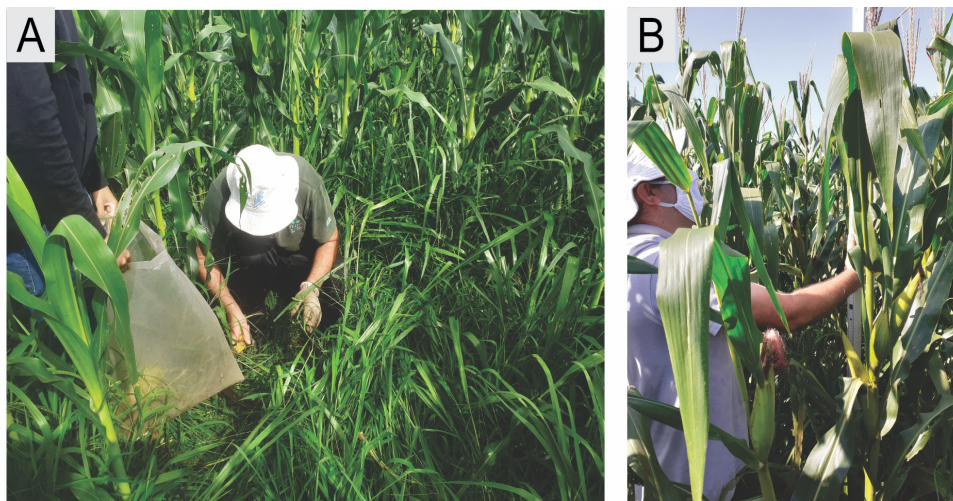
Coleta de dados agrometeorológicos: Nesses experimentos também foram avaliadas as variáveis agrometeorológicas - radiação solar global, radiação fotossinteticamente ativa (RFA), temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e chuva. As medidas foram realizadas, continuamente, por uma estação meteorológica instalada na área experimental.

Calibração do modelo de estimativa da produtividade:

O modelo utilizado nesse trabalho foi o APSIM, com o objetivo de estimar a produtividade de milho e capim-piatã, em sistemas de monocultivo, e de milho e capim-piatã consorciados em um sistema de integração lavoura-pecuária.

A calibração do modelo deu-se a partir da alteração dos seus parâmetros intrínsecos, visando diminuir a diferença entre os valores observados a campo de uma dada variável da cultura em relação aos valores estimados pelos modelos. A calibração foi definida como adequada quando se obteve o menor erro médio e o menor erro médio absoluto entre os valores estimados e os observados. Além dos erros, foram utilizados os índices estatísticos: análise de regressão linear, coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação (r) de Pearson, índice de concordância (d) de Willmott (Willmott et al., 1985) e coeficiente de eficiência da modelagem (NSE) de Nash; Sutcliffe (1970).

Na calibração do APSIM-*Tropical pasture* e do APSIM-*Maize* para a estimativa do crescimento do capim-piatã e do milho consorciados, foi organizada uma simulação de culturas consorciadas, que permite a utilização de duas culturas em uma mesma simulação, estimando a competição dessas culturas por radiação solar, água no solo e nitrogênio.



Fotos: José R. M. Pezzopane



Figura 2. Fotos do experimento 3: da coleta de biomassa (A), medição de altura (B) e manuseio das amostras em laboratório (C e D), em experimento do consórcio milho-braquiária, em São Carlos, SP.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos no processo de parametrização do modelo APSIM para a estimativa da produtividade de milho para silagem e capim-piatã consorciados em sistema de plantio direto, em safrinha com irrigação, foram satisfatórios (experimento 2). Os índices estatísticos obtidos na comparação entre os dados observados e estimados de ambas as culturas demonstram a eficiência do modelo (Tabela 1).

Tabela 1. Índices estatísticos para as simulações de biomassa total e massa de folha, colmo, palha, ráquis, grão e material morto da cultura do milho para silagem; e de massa de forragem e massa de folha e colmo do capim-piatã em consórcio, sob manejo de semeadura direta e cultivo em safrinha com irrigação, utilizando os modelos APSIM-Maize e APSIM-Tropical Pasture.

| Cultura | Variável | Índice estatístico | | | |
|-------------|-------------------|--------------------|------|--------|-------|
| | | R ² | NSE | EM | EAM |
| Milho | Biomassa total | 0,99 | 0,99 | -16,3 | 151,0 |
| | Massa de folha | 0,90 | 0,84 | -6,0 | 186,9 |
| | Massa de colmo | 1,00 | 0,98 | 136,5 | 136,5 |
| | Massa de palha | 0,99 | 0,99 | -12,7 | 26,8 |
| | Massa de ráquis | 0,92 | 0,91 | -28,2 | 28,7 |
| | Massa de grão | 1,00 | 0,99 | -18,5 | 18,5 |
| | Material morto | 0,93 | 0,89 | -33,3 | 43,7 |
| Capim-piatã | Massa de forragem | 0,88 | 0,66 | -162,5 | 162,5 |
| | Massa de folha | 0,81 | 0,64 | -83,4 | 92,2 |
| | Massa de colmo | 0,96 | 0,66 | -79,1 | 79,1 |

R²: coeficiente de determinação; NSE: eficiência de Nash-Sutcliffe; EM: erro médio (kg ha⁻¹); EAM: erro absoluto médio (kg ha⁻¹).

Com relação às estimativas de biomassa total do milho, o índice R² = 0,99 demonstra a precisão da simulação, a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0,99 indica boa exatidão e os erros médio (EM) de -16,3 kg ha⁻¹ e absoluto médio (EAM) de 151,0 kg ha⁻¹ permitem inferir que as incertezas na simulação são baixas. As estimativas das massas dos diferentes órgãos da planta (folha, colmo, palha, ráquis e grão) e de material morto também indicam o bom desempenho do modelo (Tabela 1).

Para se chegar a esses valores foi realizada uma calibração do modelo APSIM-Maize para considerar valores de parâmetros que levassem em conta as características dos híbridos de milho para silagem utilizados nesse estudo. As principais alterações feitas em relação aos parâmetros originais do modelo foram referentes à fenologia da planta, eficiência de uso da radiação, partição de fotoassimilados, área foliar específica e senescência.

A fenologia da planta foi alterada pelo aumento da duração das fases fenológicas entre o florescimento, o enchimento de grãos e a maturação da planta. A eficiência de uso da radiação foi aumentada de 2 g MJ⁻¹ para 3 g MJ⁻¹. A partição de fotoassimilados foi reduzida para o crescimento de raízes, palha, ráquis e grãos, e aumentada para o crescimento de colmo e folha. A área foliar específica máxima e mínima foi reduzida em relação à calibração original. A senescência de folhas foi reduzida para simular os valores de material morto observados no presente trabalho.

Os resultados da simulação da biomassa total de milho ao longo do experimento 2 (Figura 3) mostram que as simulações foram eficientes ao longo de todo o ciclo da cultura, indicando que o modelo é eficiente para simular essa cultura em épocas alternativas de semeadura ou em safrinha com irrigação.

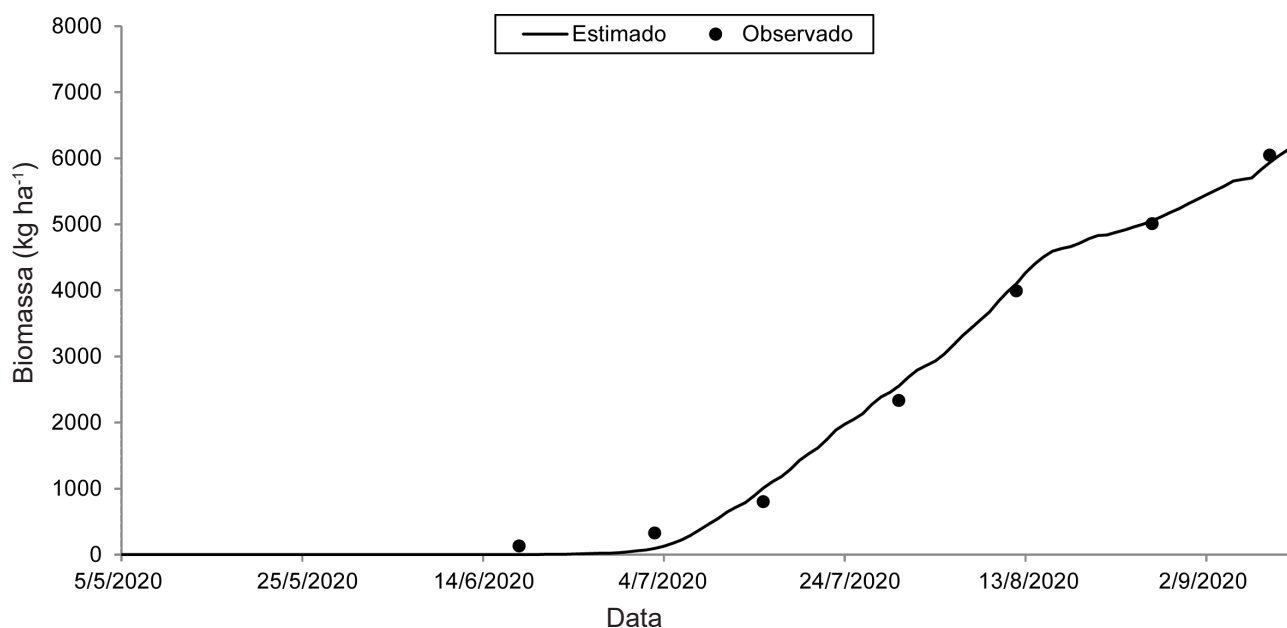


Figura 3. Série temporal da biomassa aérea total (kg ha⁻¹) observada e estimada para a cultura do milho para silagem em consórcio com capim-piatã, em manejo de semeadura direta e irrigado, em São Carlos, SP.

As simulações do crescimento do capim-piatã sob o milho também foram satisfatórias (Tabela 1). Os resultados para a estimativa de massa de forragem foram: R^2 de 0,88; NSE de 0,66; EM de -162,5 kg ha⁻¹ e EAM de 165,2 kg ha⁻¹. As estimativas de massa de folha e de colmo também apresentaram bons índices (Tabela 1). Para se atingir esses resultados foi necessário modificar o modelo original por meio da inserção de uma nova função para estimar a interceptação de radiação pelo capim. Essa função calculou a radiação que chegou até o dossel do capim, descontando-se a radiação que foi interceptada pelo milho. Desse modo, considerou-se somente a radiação que atravessa o dossel do milho. Além disso, foi necessário inserir uma função para modificação da partição de fotoassimilados em função da radiação interceptada, a qual aumenta a partição para o crescimento de colmos e diminui para o crescimento de folhas, quando há altos níveis de sombreamento (interceptação de radiação abaixo de 15 MJ m⁻² d⁻¹). Isso pode ser justificado pelo fato de as plantas alongarem seus colmos em busca de luz, quando são cultivadas em condições de sombreamento severo (Bosi et al., 2014).

As simulações da massa de forragem de capim-piatã apresentaram bons resultados quando este foi cultivado sob o milho, exceto pelo último dado observado, em que ocorreu superestimativa pelo modelo (Figura 4). Isso demonstra que as modificações feitas no modelo foram adequadas para simular com eficiência as interações entre o milho e o capim, principalmente as competições por radiação solar, água e nitrogênio. Porém, há necessidade de ajustar os coeficientes que governam as simulações do capim no final do ciclo e depois da colheita do milho, quando há o aumento da incidência de radiação, e o modelo superestima significativamente o crescimento da forrageira.

Os resultados da validação do modelo, considerando o experimento 1, realizado na safra 2017/2018, para milho e capim-piatã consorciados foram satisfatórios. Os índices estatísticos obtidos demonstram a eficiência do modelo para dois conjuntos de dados independentes, em sequeiro (Tabela 2) e com irrigação (Tabela 3). Isso confirma que o processo de calibração foi eficiente e os valores dos parâmetros estão adequados tanto para simulação em período de safra como de safrinha, bem como para condição irrigada e de sequeiro.

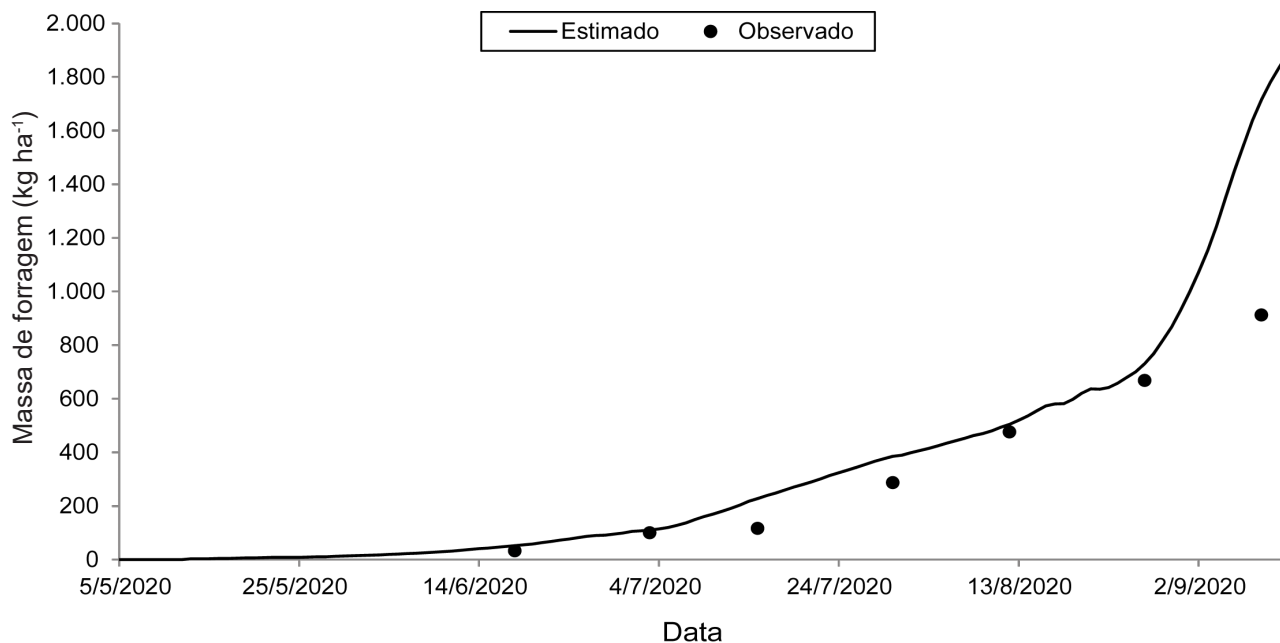


Figura 4. Série temporal da massa de forragem (kg ha^{-1}) observada e estimada para o capim-piatã em consórcio com a cultura do milho para silagem, cultivado em semeadura direta e irrigado, em São Carlos, SP.

Tabela 2. Índices estatísticos para as simulações de biomassa total e massa de folha, colmo, palha, ráquis, grão e material morto da cultura do milho para silagem; e de massa de forragem e massa de folha e colmo do capim-piatã consorciados, cultivados em sequeiro e sob semeadura direta, utilizando os modelos APSIM-Maize e APSIM-Tropical Pasture.

| Cultura | Variável | Índice estatístico | | | |
|-------------|-------------------|--------------------|------|--------|--------|
| | | R ² | NSE | EM | EAM |
| Milho | Biomassa total | 0,93 | 0,92 | 774,9 | 1184,5 |
| | Massa de folha | 0,74 | 0,60 | 335,6 | 541,6 |
| | Massa de colmo | 0,82 | 0,79 | 386,8 | 868,9 |
| | Massa de palha | 1,00 | 1,00 | -2,5 | 18,0 |
| | Massa de ráquis | 0,95 | 0,94 | 11,0 | 67,4 |
| | Massa de grão | 1,00 | 1,00 | 8,1 | 8,1 |
| | Material morto | 0,98 | 0,85 | 35,9 | 40,3 |
| Capim-piatã | Massa de forragem | 0,96 | 0,80 | -198,8 | 198,8 |
| | Massa de folha | 0,94 | 0,57 | -138,5 | 138,5 |
| | Massa de colmo | 0,92 | 0,81 | -60,2 | 90,4 |

R²: coeficiente de determinação; NSE: eficiência de Nash-Sutcliffe; EM: erro médio (kg ha^{-1}); EAM: erro absoluto médio (kg ha^{-1}).

Tabela 3. Índices estatísticos para as simulações de biomassa total e massa de folha, colmo, palha, ráquis, grão e material morto da cultura do milho para silagem; e de massa de forragem e massa de folha e colmo do capim-piatã consorciados, sob manejo de semeadura convencional e cultivo irrigado, utilizando os modelos APSIM-Maize e APSIM-Tropical Pasture.

| Cultura | Variável | Índice estatístico | | | |
|-------------|-------------------|--------------------|------|-------|-------|
| | | R ² | NSE | EM | EAM |
| Milho | Biomassa total | 0,99 | 0,98 | 207,4 | 505,9 |
| | Massa de folha | 0,84 | 0,80 | 22,9 | 117,2 |
| | Massa de colmo | 0,92 | 0,90 | -85,9 | 377,7 |
| | Massa de palha | 0,90 | 0,90 | 32,1 | 224,5 |
| | Massa de ráquis | 0,88 | 0,87 | 59,5 | 151,4 |
| | Massa de grão | 0,99 | 0,98 | 178,8 | 178,8 |
| | Material morto | 0,46 | 0,88 | -43,6 | 43,6 |
| Capim-piatã | Massa de forragem | 0,65 | 0,50 | 70,0 | 252,3 |
| | Massa de folha | 0,70 | 0,52 | 80,7 | 173,4 |
| | Massa de colmo | 0,73 | 0,61 | -10,7 | 218,9 |

R²: coeficiente de determinação; NSE: eficiência de Nash-Sutcliffe; EM: erro médio (kg ha⁻¹); EAM: erro absoluto médio (kg ha⁻¹).

O gráfico com a simulação da biomassa aérea total de milho ao longo do experimento 1 (Figura 5) indica que as simulações foram eficientes ao longo de todo o ciclo da cultura. Porém, houve subestimativa da biomassa no final do período vegetativo, o que se deve ao fato de o modelo não ter sido capaz de simular o acúmulo acelerado de folha e colmo naquele período, fato que não foi limitante para a simulação em geral.

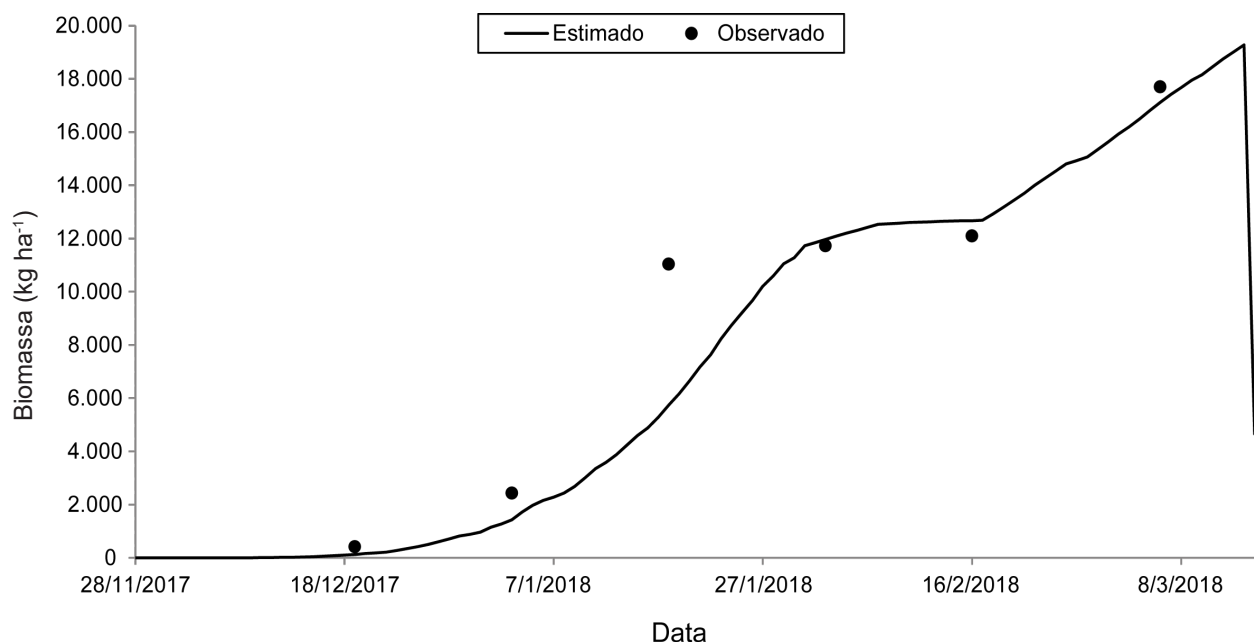


Figura 5. Série temporal da biomassa total (kg ha⁻¹) observada e estimada para a cultura do milho para silagem em consórcio com capim-piatã, cultivado em sequeiro e sob semeadura direta, em São Carlos, SP.

A Figura 6 demonstra que a simulação da massa de forragem de capim-piatã apresentou bons resultados em todas as fases de cultivo sob o milho. Isso demonstra que a calibração realizada é eficiente para estimar a competição por água, nutrientes e radiação solar, bem como o seu efeito sobre a produtividade de forragem do capim-piatã.

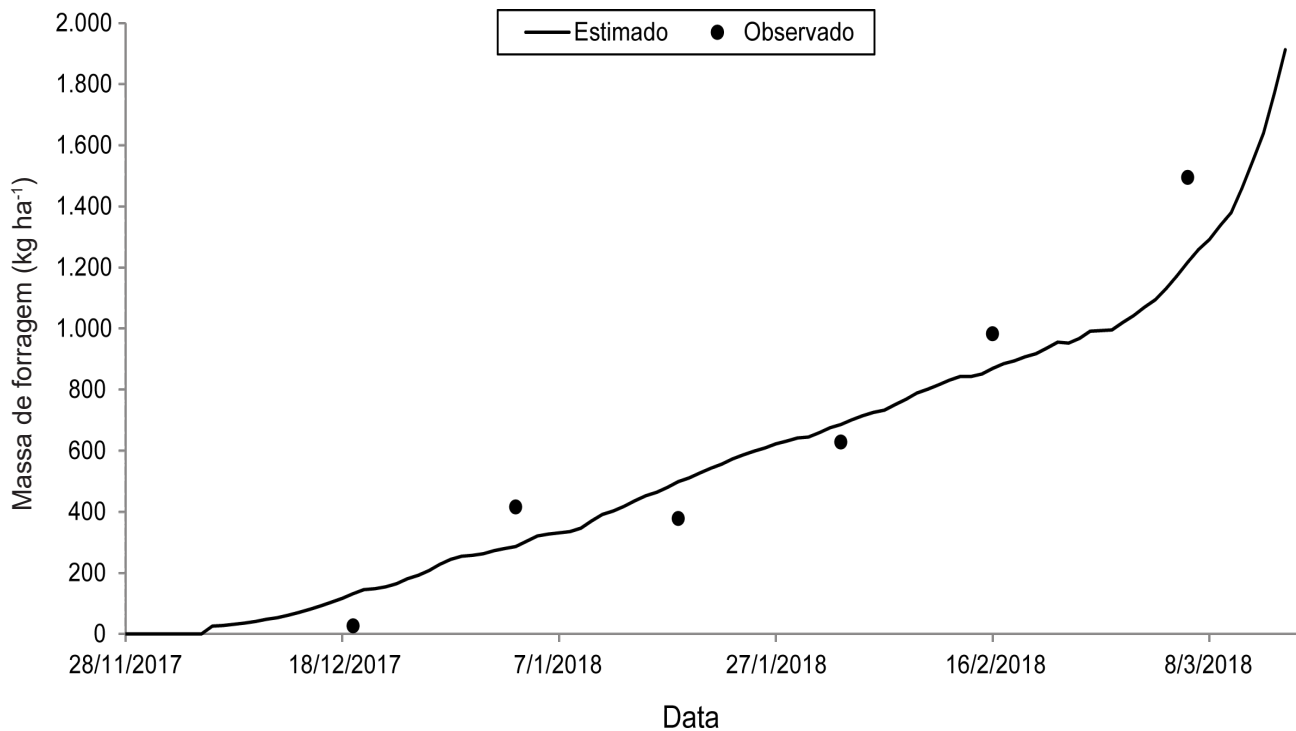


Figura 6. Série temporal da massa de forragem (kg ha^{-1}) observada e estimada para a o capim-piatã em consórcio com a cultura do milho para silagem, cultivado em sequeiro e sob semeadura direta, em São Carlos, SP.

O gráfico com a simulação da biomassa total de milho ao longo do experimento 3 (Figura 7) indica que as simulações foram eficientes ao longo de todo o ciclo da cultura, com pequenas subestimativas no final do período vegetativo e início do período reprodutivo da cultura.

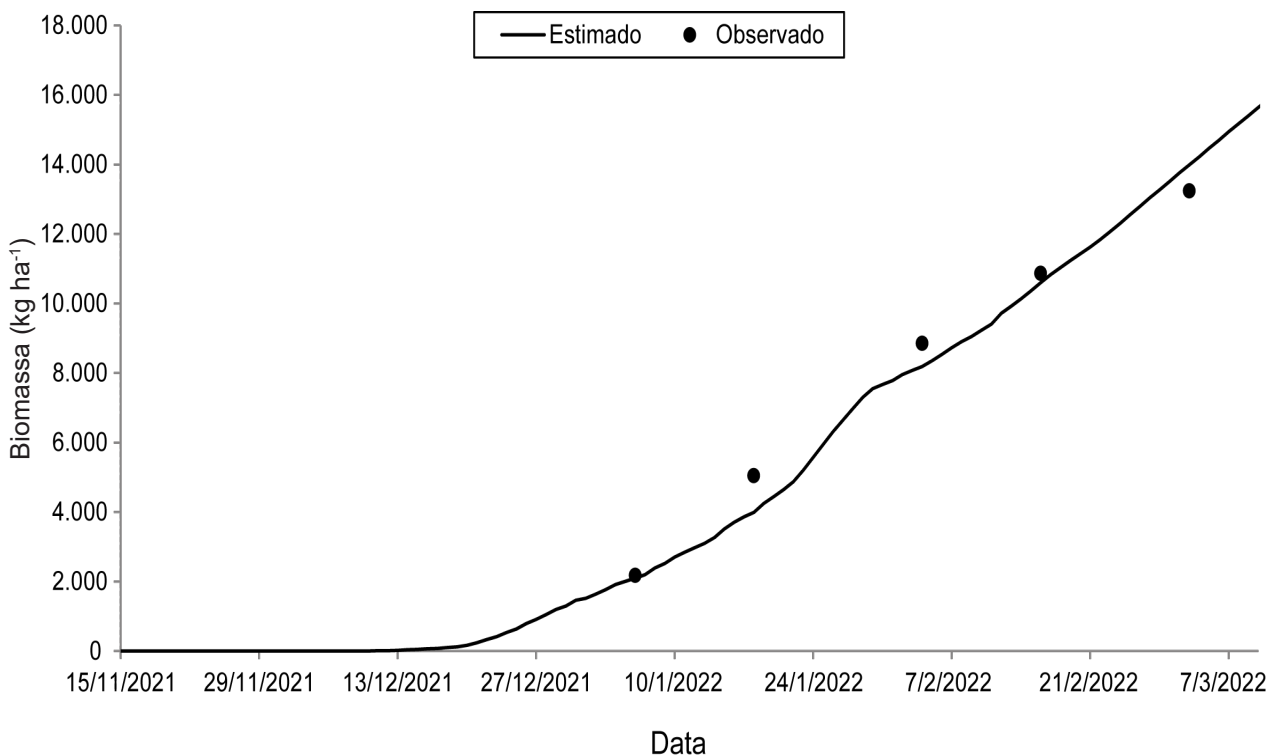


Figura 7. Série temporal da biomassa total (kg ha^{-1}) observada e estimada para a cultura do milho para silagem em consórcio com capim-piatã, cultivado sob semeadura convencional e irrigado, em São Carlos, SP.

A Figura 8 demonstra que a simulação da massa de forragem de capim-piatã apresentou bons resultados em todas as fases da cultura, apesar de haver alguns pontos em que houve maior dispersão em relação à linha de dados estimados. Isso demonstra que a calibração realizada é eficiente para estimar o crescimento do capim-piatã em sistemas irrigados e com semeadura convencional, bem como a competição por radiação solar no consórcio.

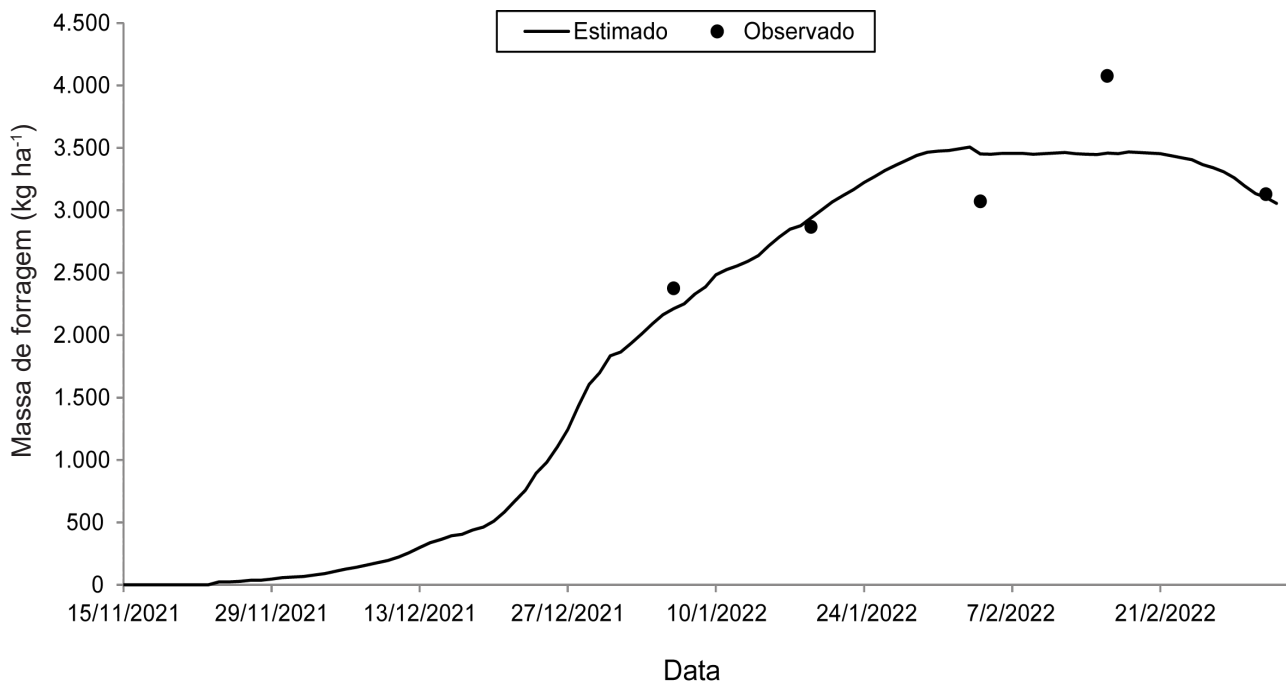


Figura 8. Série temporal da massa de forragem (kg ha^{-1}) observada e estimada para a o capim-piatã em consórcio com a cultura do milho para silagem, cultivado sob semeadura convencional e irrigado, em São Carlos, SP.

Conclusões

- 1) Os resultados alcançados na simulação de milho para silagem e capim-piatã consorciados mostraram-se satisfatórios e indicam que o modelo APSIM é promissor para a simulação de culturas consorciadas e de sistemas de integração lavoura-pecuária.
- 2) Os diferentes sistemas e épocas de cultivo, bem como a competição por radiação solar, água e nutrientes, foram satisfatoriamente simulados, o que indica a capacidade do modelo em estimar a competição nesses sistemas e os seus efeitos sobre a produtividade das culturas consorciadas.
- 3) Destaca-se que há necessidade de melhorias no modelo para a simulação do crescimento do capim no final do ciclo do milho, quando a transmissão de radiação por este último é maior, resultando em maior potencial produtivo do capim. Além disso, recomenda-se a realização de estudos para calibrar os modelos para a simulação do capim após o corte do milho para silagem.

Referências

- AGRICULTURAL PRODUCTION SYSTEMS SIMULATOR (APSIM). Disponível em: www.apsim.info. Acesso em: 20 dez. 2013.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES (ABIEC). *Beef Report 2023*. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/catpub/impresos/>. Acesso em: 5 jul. 2023.
- BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SENTELHAS, P. C.; SANTOS, P. M.; NICODEMO, M. L. F. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 6, p. 449-456, jun. 2014.

- 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**, n. 184, 102917, 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, 102724, jan. 2020b.
- BROWN, H. E.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P.; TEIXEIRA, E. I.; ZYSKOWSKY, R. F.; HARGREAVES, J. N. G.; MOOT, D. J. Plant modelling framework: software for building and running crop models on the APSIM platform. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 385-398, 2014.
- BROWN, H. E.; TEIXEIRA, E. I.; HUTH, N. I.; HOLZWORTH, D. P. **The APSIM Maize Model**. 2015. Disponível em: <https://builds.apsim.info/api/nextgen/docs/Maize.pdf>. Acesso em: 25 maio 2017.
- CECCON, G.; BORGHI, E.; CRUSCIOL, C. A. C. Modalidades e métodos de implantação do consórcio milho-braquiária. In: CECCON, G. **Consórcio milho-braquiária**. Brasília, DF: Embrapa, 2013. p. 27-48.
- DIAS FILHO, M. B. **Degradação de pastagens: o que é e como evitar**. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 19 p.
- GIRALDO, L. M.; LIZCANO, L. J.; GIJSMAN, A. J.; RIVERA, B.; FRANCO, L. H. Adaptación del modelo DSSAT para simular la producción de *Brachiaria decumbens*. **Pasturas Tropicales**, v. 20, n. 2, p. 2-12, 1998.
- GOMES, F. J.; BOSI, C.; PEDREIRA, B. C. e; SANTOS, P. M.; PEDREIRA, C. G. S. Parameterization of the APSIM model for simulating palisadegrass growth under continuous stocking in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural Systems**, v. 184, 102876, 2020.
- HOLZWORTH, D.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; VAN OOSTEROM, E. J.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A.; BROWN, H.; WHISH, J. P. M.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L. W.; PEAKE, A. S.; POULTON, P. L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P. J.; GAYDON, D. S.; DALGLIESH, N. P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F. Y.; WANG, E.; HAMMER, G. L.; ROBERTSON, M. J.; DIMES, J. P.; CARBERRY, P.; WHITBREAD, A. M.; HUNT, J.; VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P. S.; HARGREAVES, J. N. G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDFORD, J.; WEDGEWOOD, S.; KEATING, B. A. APSIM evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327-350, 2014.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, jul. 2009.
- MAGAIA, E.; FAMBA, S.; WESSTRÖM, I.; BRITO, R.; JOEL, A. Modelling maize yield response to plant density and water and nitrogen supply in a semi-arid region. **Field Crops Research**, v. 205, p. 170-181, 2017.
- 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.
- NGWIRA, A. R.; AUNE, J. B.; THIERFELDER, C. DSSAT modelling of conservation agriculture maize response to climate change in Malawi. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 85-94, 2014.
- PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; LARA, M. A. S.; ALDERMAN, P. D. Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. **Field Crops Research**, v. 120, n. 3, p. 370-379, 2011.
- PEQUENO, D. N. L.; PEDREIRA, C. G. S.; BOOTE, K. J.; ALDERMAN, P. D.; FARIA, A. F. G. Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: Implications for comparison of three tropical pasture grasses. **Grass Forage Science**, v. 73, p. 440-455, 2017.
- PRIMAVESI, O. **A pecuária de corte brasileira e o aquecimento global**. São Carlos, SP: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007. 42 p.
- REYENGA, P. J.; HOWDEN, S. M.; MEINKE, H.; MCKEON, G. M. Modelling global change impact on wheat cropping in south-east Queensland, Australia. **Environmental Modelling and Software**, v. 14, n. 4, p. 297-306, 1999.
- SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; OLIVEIRA, J. B. de; COELHO, M. R.; LUMBRERAS, J. F.; CUNHA, T. J. F. (ed.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- 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**, v. 70, n. 2, p. 159-168, 2019.
- SMETHURST, P. J.; HUTH, N. I.; MASIKATI, P.; SILESHI, G. W.; AKINNIFESI, F. K.; WILSON, J.; SINCLAIR, F. Accurate crop yield predictions from modelling tree-crop interactions in gliricidia-maize agroforestry. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 70-77, 2017.

SOUZA, D. P. de; MENDONÇA, F. C.; BOSI, C.; PEZZOPANE, J. R. M.; SANTOS, P. M. APSIM-Tropical Pasture model parameterization for simulating Marandu palisade grass growth and soil water in irrigated and rainfed cut-and-carry systems. **Grass and Forage Science**, mar. 2022. 16 p.

TONG, D.; JING, W.; DI, H.; NA, W. Modelling the impacts of climate change on spring maize yield in Southwest China using the APSIM model. **Resources Science**, v. 38, n. 1, p. 155-165, 2016.

VUČETIĆ, V. Modelling of maize production in Croatia: present and future climate. **The Journal of Agricultural Science**, v. 149, n. 2, p. 145–157, 2011.

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**, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.



MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA E
PECUÁRIA