



JOSÉ ROBERTO DE OLIVEIRA

**PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM EM SISTEMA DE
CULTIVO MILHO-BRAQUIÁRIA EM REGIME SEQUEIRO E
IRRIGADO**

**TERESINA - PI
2024**

JOSÉ ROBERTO DE OLIVEIRA

**PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM EM SISTEMA DE CULTIVO MILHO-
BRAQUIÁRIA EM REGIME SEQUEIRO E IRRIGADO**

Tese apresentada à Universidade Federal do
Piauí, como parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia.

ORIENTADOR

Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior

Coorientador

Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane

TERESINA- PI

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial CCA
Serviço de Representação da Informação

O48p

Oliveira, José Roberto de.

Parametrização do modelo APSIM em sistema de cultivo milho-braquiária em regime sequeiro e irrigado / José Roberto de Oliveira. -
- 2024.

135 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Teresina, 2024.

“Orientador: Prof. Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior.”

1. Simulação agrícola. 2. Modelo de cultura 3. Forragem. 5. Agrícola. I. Andrade Júnior, Aderson Soares de. II. Título.

CDD 633.151

JOSÉ ROBERTO DE OLIVEIRA

**PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM EM SISTEMA DE CULTIVO MILHO-
BRAQUIÁRIA EM REGIME SEQUEIRO E IRRIGADO**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronomia.

APROVADA em 22 de março de 2024

Comissão Julgadora:

Documento assinado digitalmente
 **HENRIQUE ANTUNES DE SOUZA**
Data: 24/03/2024 12:38:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Henrique Antunes de Souza – EMBRAPA Meio-Norte/Membro Interno

Documento assinado digitalmente
 **EDSON ALVES BASTOS**
Data: 26/03/2024 09:04:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Edson Alves Bastos – EMBRAPA Meio-Norte/Membro Interno

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO SILVA DE SOUSA**
Data: 26/03/2024 15:13:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Silva de Sousa – UFPI/Membro Interno

Documento assinado digitalmente
 **MILTON JOSE CARDOSO**
Data: 26/03/2024 10:08:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Milton José Cardoso – EMBRAPA Meio-Norte/Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **JOSE RICARDO MACEDO PEZZOPANE**
Data: 24/03/2024 07:24:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Ricardo Macedo Pezzopane – EMBRAPA Pecuária Sudeste/Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **ADERSON SOARES DE ANDRADE JÚNIOR**
Data: 22/03/2024 14:56:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior – EMBRAPA Meio-Norte
(Orientador)**

**TERESINA-PI
2024**

A todos os mestres que contribuíram com a minha caminhada, em especial, Aderson Soares de Andrade Júnior, Edson Alves Bastos e Henrique Antunes de Souza.

OFEREÇO

Aos meus queridos pais, José da Costa Barros e Francisca Oliveira Barros, pelos conselhos, ensinamentos, amor e dedicação, que foram fundamentais para a realização dos meus sonhos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por não me deixar fracassar me mantendo firme na caminhada! Por me proporcionar a oportunidade de estar sempre em boas companhias que muito contribuíram com o meu objetivo.

Aos meus pais, José da Costa Barros e Francisca Oliveira Barros, por me apoiarem sempre, ainda que as dificuldades fossem muitas; aos meus irmãos e irmãs, pelo incentivo e apoio nos momentos difíceis.

À Universidade Federal do Piauí, pela oportunidade de realização da Pós-Graduação.

À Embrapa Meio-Norte, pelo apoio no desenvolvimento do projeto e pela infraestrutura concedida, incluindo o espaço físico de laboratórios e o auxílio de pessoal para realização do experimento.

À Fazenda Barbosa, em especial aos proprietários Sr. Vitor e Dona Fátima, pela parceria em ceder a área para realização da segunda etapa da pesquisa e coleta de dados.

Ao meu orientador, Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior, pelos ensinamentos, dedicação, pela paciência e compreensão, sobretudo por estar sempre disposto a dirimir dúvidas e me ajudar na condução da pesquisa.

Ao Dr. Edson Alves Bastos, por compartilhar seus conhecimentos, sempre com paciência, compreensão, respeito e dedicação, pelo apoio durante a condução do experimento, pelas sugestões para melhorar a redação da tese e, principalmente, pelas palavras de incentivo durante os momentos de dificuldade.

Ao Dr. Milton José Cardoso e Dr. Raimundo Bezerra, pelas preciosas colaborações em orientações de condução das culturas em campo.

Ao Dr. Henrique Antunes de Souza, pela colaboração nas análises de solo e pela contribuição com as recomendações de adubação.

Ao Dr. Cristiam Bosi, pela valorosa colaboração e ensinamentos na manipulação da plataforma APSIM para obtenção dos resultados analíticos da pesquisa.

À Leslly Raquel, Ruan Bezerra, Alzeneide, Maria Eduarda, José, Gustavo, Hosana, pela Amizade e pela colaboração nas atividades de condução e avaliação do experimento de campo.

Aos funcionários da Embrapa Meio-Norte, em especial, Antônio Vieira, Rocha, Paulo, Joel, Nonato, Gustavo, Mauro, pela ajuda nas atividades de campo.

Agradeço a todo o corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, em especial, aos professores Carlos Humberto, Aécio Bezerra, Ricardo Silva, Ademir Araújo, Carlos Lima, Artenisa Cerqueira, Edinaldo Mousinho, Jadson Antunes, Francisco Alcântara, Melissa Oda e Aurenívia Bonifácio, pelo conhecimento transmitido.

Ao Silas Tavares Mesquita, secretário do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela dedicação em nos atender sempre bem.

Aos meus colegas de Pós-Graduação, em especial, Hildete, Talyta, Rayssa, Larissa, Hosana, Carlos Pedro, por todos os momentos de convivência.

Aos amigos Alzeneide, Sebastião Nascimento, Theudes, pelo apoio e pelas palavras de incentivo nos momentos difíceis.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta etapa de minha formação acadêmica.

Minha eterna e singela gratidão...

“A lei de ouro do comportamento é a tolerância mútua, já que nunca pensaremos todos da mesma maneira, já que nunca veremos senão uma parte da verdade e sob ângulos diversos.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO APSIM EM SISTEMA DE CULTIVO MILHO-BRAQUIÁRIA EM REGIME SEQUEIRO E IRRIGADO

Modelos mecanicistas baseados em processos, tais como o Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM), têm sido utilizados em várias pesquisas para simular o crescimento e o desenvolvimento de pastagens e graníferas, tanto em cultivo solteiro como consorciado. O presente estudo objetivou parametrizar e avaliar o desempenho do Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM), para a estimativa do crescimento e produtividade de milho e braquiária em sistemas de cultivo solteiro e consórcio milho-braquiária, no Norte Piauiense e Leste Maranhense. A parametrização foi realizada com dados experimentais coletados no Campo Experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina-PI, situada na região Centro-Norte Piauiense, e a parametrização, com dados experimentais coletados na Fazenda Barbosa, em Brejo-MA, localizada no Leste Maranhense. A radiação PAR e o teor de água do solo foram os principais parâmetros aferidos, com o objetivo de calibrar o coeficiente de extinção de luz e a eficiência de uso da radiação, além de ajustes nos parâmetros fenológicos e estruturais do milho. Avaliações subsequentes incluíram biomassa seca total, biomassa de folhas, caules, índice de área foliar (IAF) para ambas as culturas, e órgãos reprodutivos do milho (palha, ráquis e grãos). Na calibração, o modelo apresentou valores para R^2 variando entre 0,81 e 0,99 e NSE entre 0,72 e 0,99, para braquiária solteira, e R^2 variando entre 0,87 e 0,93 e NSE entre 0,62 e 0,67, para braquiária consorciada, respectivamente. Na calibração do milho solteiro, o modelo apresentou variação de R^2 entre 0,43 e 0,97 e o NSE entre -3,33 e 0,95. Na calibração do milho consorciado, o R^2 variou entre 0,30 e 0,93 e NSE entre 0,21 e 0,92, respectivamente. Na calibração no segundo ambiente, o modelo simulou a braquiária solteira, para as mesmas variáveis com boa precisão, variando o R^2 entre 0,95 a 0,97 e o NSE entre 0,08 a 0,97; e a braquiária consorciada variou o R^2 entre 0,09 a 0,87 e apresentou inexatidão para todas as variáveis, com NSE variando entre -1035,25 a -3,33, respectivamente. Na parametrização do milho solteiro, o R^2 variou entre 0,11 e 0,90 e o NSE variou de inexato a exato entre -0,37 e 0,90. O milho consorciado variou o R^2 entre 0,44 e 0,87 para as melhores simulações e o NSE variou de inexato a exato com valores entre -4,39 a 0,68. O modelo APSIM apresentou boa performance nas simulações realizadas na calibração da braquiária Ruziziensis, em cultivo solteiro e consórcio; e, na calibração da braquiária Marandu, apenas em cultivo solteiro. As simulações da braquiária Marandu consorciada foram imprecisas. As simulações do milho em cultivo solteiro e consorciado apresentaram, na calibração para os dois ambientes, performance satisfatória a razoável.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação agrícola, modelo de cultura, forragem, agrícola.

ABSTRACT

PARAMETERIZATION OF THE APSIM MODEL IN A BRACHIARIA AND MAIZE CULTIVATION SYSTEM UNDER IRRIGATED AND NON-IRRIGATED CONDITIONS

Process-based mechanistic models, such as the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM), have been used in several research studies to simulate the growth and development of pastures and grain crops, both in single and intercropped cultivation. The present study aimed to parameterize and evaluate the performance of the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) to estimate the growth and productivity of corn and brachiaria in single and consortium cropping systems in the North of Piauí and in the East of Maranhão State. The parameterization was carried out with experimental data collected at the Experimental Field of Mid-North Embrapa, in Teresina-PI, located in the Center-North region of Piauí, and the parameterization with experimental data collected at Barbosa Farm in Brejo-MA, located in the East of Maranhão. PAR radiation and soil water content were the main parameters measured, with the aim of calibrating the light extinction coefficient and radiation use efficiency, as well as adjustments to the phenological and structural parameters of maize. Subsequent assessments included total dry biomass, biomass of leaves, stems, leaf area index (LAI) for both crops, and maize reproductive organs (straw, rachis and grains). In calibration, the model presented values for R^2 varying between 0.81 and 0.99 and NSE between 0.72 and 0.99, for single brachiaria, and R^2 varying between 0.87 and 0.93 and NSE between 0.62 and 0.67 for intercropped brachiaria, respectively. In the single maize calibration, the model presented a variation in R^2 between 0.43 and 0.97 and the NSE between -3.33 and 0.95. In the calibration of intercropped maize, R^2 varied between 0.30 and 0.93 and NSE between 0.21 and 0.92, respectively. In the calibration in the second environment, the model simulated single brachiaria for the same variables with good precision, varying the R^2 between 0.95 and 0.97 and the NSE between 0.08 and 0.97; and the intercropped brachiaria varied the R^2 between 0.09 and 0.87 and presented inaccuracy for all variables with NSE varying between -1035.25 and -3.33, respectively. In the single maize parameterization, the R^2 varied between 0.11 and 0.90 and the NSE varied from inaccurate to exact between -0.37 and 0.90. The intercropped maize varied the R^2 between 0.44 and 0.87 for the best simulations and the NSE varied from inaccurate to exact with values between -4.39 to 0.68. The APSIM model showed good performance in the simulations carried out to calibrate the *Brachiaria ruziziensis* in single and intercropped cultivation; and, in the calibration of brachiaria Marandu, only in single cultivation. The simulations of the Marandu brachiaria intercrop were inaccurate. The simulations of maize in single and intercropped cultivation presented, in the calibration for both environments, satisfactory to reasonable performance.

KEYWORDS: Agricultural simulation, crop model, forage, agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do Estado do Piauí. Área Experimental, Embrapa Meio-Norte, Teresina-PI.....	32
Figura 2. Valores de temperatura do ar e precipitação referentes ao período de 7 de junho a 29 de setembro de 2021, obtidas da estação automática, INMET, Teresina-Piauí, Brasil	34
Figura 3. Área Experimental, Embrapa Meio-Norte, Teresina-Piauí, Brasil. Disposição do ensaio experimental em campo.....	35
Figura 4. Localização do Estado do Maranhão. Fazenda Barbosa, município de Brejo-Maranhão, Brasil	46
Figura 5. Valores de temperatura do ar e precipitação referentes ao período de 18 de fevereiro a 24 de junho de 2022, obtidas da estação automática, instalada na Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil	48
Figura 6. Área Experimental, Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil. Disposição do ensaio experimental em campo.....	49
Figura 7. Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observada e estimada, utilizada na parametrização do capim braquiária Ruziziensis, cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil	54
Figura 8. Regressão linear entre acúmulo de forragem (g m^{-2}) e radiação solar global interceptada (MJ m^{-2}) para capim braquiária Ruziziensis, avaliado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil	55
Figura 9. Variação de massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Ruziziensis, sob cultivo em sistema solteiro e regime irrigado, realizado no período de junho a setembro de 2021, em Teresina-Piauí, Brasil.....	58
Figura 10. Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Ruziziensis sob cultivo em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha^{-1}), Erro absoluto médio (MAE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)	61

Figura 11. Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do capim braquiária Ruziziensis, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil	62
Figura 12. Variação da massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Ruziziensis, sob cultivo em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil.....	66
Figura 13. Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Ruziziensis sob cultivo em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha ⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %).....	68
Figura 14. Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil.....	69
Figura 15. Variação de massa viva e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil	73
Figura 16. Variação de massa de palha, ráquis e grãos, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil	74
Figura 17. Relações entre a massa viva de milho e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina- Piauí, Brasil.....	76

Figura 18. Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil	78
Figura 19. Variação de radiação e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do milho cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil.....	79
Figura 20. Variação de massa viva e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema consorciado, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil.....	83
Figura 21. Variação de massa de palha, ráquis e grãos, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil.....	85
Figura 22. Relações entre a massa viva e o índice de área foliar, observadas e previstas, para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha ⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %).....	86
Figura 23. Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha ⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %).....	87
Figura 24. Variação de radiação e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e estimada, utilizada na parametrização do capim braquiária Marandu, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em cultivo realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil	89

Figura 25. Regressão linear entre acúmulo de forragem (g m^{-2}) e Radiação global interceptada (MJ m^{-2}) para capim braquiária Marandu, avaliado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil	90
Figura 26. Variação de massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro e regime sequeiro, em cultivo realizado no período de fevereiro a junho de 2022, em Brejo-Maranhão, Brasil	94
Figura 27. Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro em regime sequeiro, avaliado no período de fevereiro a junho 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha^{-1}), Erro absoluto médio (MAE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)	95
Figura 28. Variação de radiação e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e estimada, utilizada na parametrização do capim braquiária Marandu, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo- Maranhão, Brasil	96
Figura 29. Variação de massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro e regime sequeiro, em cultivo realizado no período de fevereiro a junho de 2022, em Brejo-Maranhão, Brasil.....	100
Figura 30. Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro em regime sequeiro, avaliado no período de fevereiro a junho 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha^{-1}), Erro absoluto médio (MAE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)	102
Figura 31. Variação de radiação e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil	103

Figura 32. Variação de massa viva e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil.....	107
Figura 33. Variação de massa de grãos, palha e ráquis, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil.....	108
Figura 34. Relações entre a massa viva de milho e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha ⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)	110
Figura 35. Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha ⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha ⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)	112
Figura 36. Variação de radiação e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil	113
Figura 37. Variação de massa viva e o índice de área foliar, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil.....	117
Figura 38 Variação de massa de grãos, palha e ráquis, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil	118

Figura 39. Relações entre a massa viva de milho e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo, Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %). 119

Figura 40. Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %). 120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental, Embrapa Meio Norte, Teresina-Piauí (2021)	33
Tabela 2. Características físico-hídricas do solo da área experimental. Embrapa Meio Norte, Teresina-Piauí, Brasil (2021)	35
Tabela 3. Parâmetros físico-hídricos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo APSIM. BD = densidade aparente, AirDry = solo seco ao ar, LL15 = limite inferior ou ponto de murcha permanente a -15 bar, DUL = limite superior drenado ou capacidade de campo, SAT = limite de solo saturado, KL = coeficiente de extração de água, XF = fator de exploração da raiz, SWCON = fração de água acima do DUL que escoar por dia.....	38
Tabela 4. Parâmetros químico-orgânicos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo	39
Tabela 5. Características químicas do solo da área experimental, Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil (2022)	47
Tabela 6. Características físico-hídricas do solo da área experimental. Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil (2022)	49
Tabela 7. Frações da partição estrutural de acordo com as fases fenológicas da planta e respectivo fotoperíodo crítico indicador de mudança de fase, calibrados para capim braquiária <i>Ruziziensis</i> , produzido em sistema de cultivo solteiro, avaliado entre junho e setembro de 2021, em Teresina-Piauí, Brasil	55
Tabela 8. Parâmetros dos submodelos foliar, radicular e órgãos do APSIM-Pasto Tropical, parametrizados para o capim braquiária <i>Ruziziensis</i> , produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-PI, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)	57
Tabela 9. Parâmetros do submodelo foliar e radicular parametrizados para o capim braquiária <i>Ruziziensis</i> , produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)	64
Tabela 10. Parâmetros fenológicos utilizados na calibração do milho solteiro, cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado em Teresina-Piauí, Brasil, 2021	70

- Tabela 11.** Parâmetros do submodelo foliar, caule e raiz, parametrizado para o milho cultivado em sistema de cultivo solteiro sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y) 71
- Tabela 12.** Parâmetros do submodelo palha e ráquis, parametrizado para o milho produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....72
- Tabela 13.** Parâmetros do submodelo foliar, parametrizado para o milho, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....81
- Tabela 14.** Parâmetros do submodelo de palha e ráquis parametrizado para o milho, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....82
- Tabela 15.** Frações da partição estrutural de acordo com as fases fenológicas da planta e respectivo fotoperíodo crítico indicador de mudança de fase, utilizados na parametrização do capim braquiária *Marandu*, produzido em sistema de cultivo solteiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022 em Brejo-Maranhão, Brasil.....89
- Tabela 16.** Parâmetros do submodelo foliar, caule, órgãos e raiz do APSIM-Pasto Tropical, utilizado na parametrização do capim braquiária *Marandu*, produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator.....91
- Tabela 17.** Parâmetros do submodelo foliar do APSIM-Pasto Tropical, utilizados na parametrização do capim braquiária *Marandu*, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-

Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y) 98

Tabela 18. Parâmetros fenológicos utilizados na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro na Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil, 2022 104

Tabela 19. Parâmetros do submodelo foliar, caule e raiz, utilizados na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....105

Tabela 20. Parâmetros do submodelo de palha e ráquis parametrizado para o milho, produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....106

Tabela 21. Parâmetros do submodelo foliar, caule e raiz, parametrizados para o milho, cultivado em sistema de cultivo consorciado sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....115

Tabela 22. Parâmetros do submodelo de palha e ráquis, parametrizados para o milho produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y).....116

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xv
1. INTRODUÇÃO	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1. A cultura do milho	20
2.2. A cultura da braquiária.....	24
2.3. Consórcio milho-braquiária.....	25
2.4. Modelagem do crescimento e produtividade de culturas agrícolas	28
2.5. Parametrização, calibração e validação do modelo.....	29
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Parametrização do modelo APSIM no ambiente de Teresina-PI	32
3.2 Dados experimentais e caracterização da área	32
3.3 Determinação dos parâmetros biométricos	36
3.4 Métodos de entrada no modelo APSIM	37
3.5 Estrutura do APSIM - Pastagem Tropical	39
3.6 Estrutura do APSIM – Milho	41
3.7 Estrutura do APSIM – Milho/Pastagem Tropical	42
3.8 Parametrização do APSIM – Pastagem Tropical	43
3.9 Parametrização do APSIM – Milho	44
3.10 Parametrização do APSIM - Milho/Pastagem Tropical.....	45
4. Parametrização do modelo APSIM no ambiente de Brejo-MA	46
4.1 Dados experimentais e caracterização da área	46
4.2 Determinação dos parâmetros biométricos	50
4.3 Avaliação do modelo APSIM	51
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1 Parametrização do modelo APSIM	53
5.1.1 Braquiária Ruziziensis solteira	53
5.1.2 Braquiária Ruziziensis em consórcio	61
5.1.3 Milho solteiro.....	68

5.1.4 Milho consorciado com braquiária Ruziziensis.....	78
5.2 Ensaio conduzido visando à parametrização do modelo APSIM	88
5.2.1 Braquiária Marandu solteira.....	88
5.2.2 Braquiária Marandu consorciada.....	96
5.2.3 Milho solteiro	102
5.2.4 Milho consorciado com a braquiária Marandu.....	112
6 CONCLUSÕES.....	121
REFERÊNCIAS.....	122

1 INTRODUÇÃO

A cultura do milho (*Zea mays*) tem destaque de produção no cenário mundial em plantios comerciais, devido a sua importância socioeconômica e nutricional. Estados Unidos, China e Brasil estão entre os maiores produtores do mundo (Máximo et al., 2019). A produção mundial de milho, em 2022/2023, foi cerca de 22.254,7 milhões de toneladas. O Brasil aparece como o terceiro maior produtor mundial, com produção em torno de 125 milhões de toneladas, com rendimento médio de 6.160 kg ha⁻¹, ficando atrás somente da China e dos Estados Unidos (USDA, 2023).

A Região Nordeste registrou rendimento médio de cerca de 3.133 kg ha⁻¹. Ressalta-se que o estado do Maranhão teve área plantada de 1.900,0 milhões de hectares, com rendimento médio em torno de 3.875 kg ha⁻¹ e o Piauí com área plantada de 1.925,6 milhões de hectares, com rendimento médio em torno de 3.349 kg ha⁻¹ (Conab, 2023). Contudo, esses dados oficiais contrastam com o potencial produtivo da região, considerando resultados obtidos com pesquisas em sistemas de produção, conduzidos com uso de tecnologia adequada na região, com 10.212 kg ha⁻¹ de rendimento médio de grãos de vários híbridos comerciais, nos municípios de Teresina(PI); Brejo(MA); e São Raimundo das Mangabeiras(MA) (Cardoso et al., 2023).

A instalação de pesquisa em campo para obtenção de dados de rendimento e crescimento das culturas demanda tempo e recursos para o seu desenvolvimento. Com isso, a busca por alternativas mais eficientes para diminuir as incertezas das observações em campo estão cada vez mais frequentes. Dessa forma, a modelagem de sistemas agrícolas vem se tornando uma boa alternativa, por proporcionar uma visão antecipada sobre a produção da cultura, o que contribui com a diminuição de riscos econômicos.

A modelagem de sistemas agrícolas é descrita como um conjunto de representações matemáticas ou de equações que buscam expressar as relações que ocorrem em um sistema agrícola real correlacionando as observações. As equações descrevem e simulam exatamente as interrelações e complexidade entre os componentes envolvidos, fornecendo ferramentas confiáveis para estimar eventos físicos, químicos e biológicos (Ferreira, 2018). São ferramentas importantíssimas nas interações e mudanças no clima e os seus efeitos sobre os diversos cultivos e os

possíveis impactos dessas mudanças nas condições ambientais sobre a produtividade (Asseng et al., 2015; Ferreira, 2018).

Nesse sentido, modelos de crescimento e de desenvolvimento de culturas baseados em processos podem contribuir no monitoramento e na previsão de produtividade, assim como auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas da cultura ao ambiente bem como nas tomadas de decisão (Marin et al., 2011).

Dokoohaki et al. (2016) acrescentam que os modelos de culturas ajudam no esclarecimento e na avaliação das relações das várias dimensões entre os fatores que afetam as culturas. Esses fatores incluem data de plantio, seleção de cultivares, densidade de semeadura, tipo de solo, estratégias de aplicação de fertilizantes, irrigação e padrões climáticos sazonais.

Vale destacar que inúmeros modelos estão disponíveis para prever o crescimento das culturas, dentre eles o Sistema de Apoio à Decisão para Transferência de Agrotecnologia (DSSAT) e o Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM) (Ovando et al. 2018), contribuindo para análise de impactos das mudanças climáticas na agricultura, fornecendo cenários agrícolas futuros aos pesquisadores envolvidos com o tema, permitindo a tomada de decisão em função do cenário observado e oferecendo subsídio para adaptação tecnológica do setor (Asseng et al., 2013).

O APSIM permite a simulação de várias culturas sob diversos manejos, condições de clima e solo em monocultivo e consorciado. Os relatos que explicam as simulações em monocultivo, sobretudo com pastagens tropicais, ainda requerem melhor explicação para que se compreenda a interação entre as culturas e o ambiente dentro do sistema, levando em conta os fatores que afetam as culturas (Dokoohaki et al. 2016; Souza et al., 2020; Bosi et al., 2020). Tendo em vista que os sistemas consorciados possuem uma complexidade maior, quando comparados com os monocultivos, existe a necessidade de melhor compreender o comportamento dessas culturas, a fim de diminuir as incertezas das simulações com relação às observações.

O cultivo de milho no Brasil é realizado nas diversas regiões em diferentes sistemas de cultivo, em sua maioria em monocultura; porém, o consórcio do milho com gramíneas forrageiras tem sua importância em sistemas de integração lavoura-pecuária, sobretudo com plantas forrageiras do gênero *Braquiária*. Entretanto, a dinâmica do comportamento do crescimento das forrageiras em consórcio com milho

ainda precisam ser mais bem compreendidos para se obter o máximo rendimento de grãos e forragem com esse tipo de sistema (Martuscello et al., 2009; Santos, 2017).

Os modelos de simulação são amplamente utilizados como ferramentas para explorar o impacto das várias tecnologias, auxiliando pesquisas realizadas em campo (Mupangwa et al., 2020) e permitindo explorar o impacto destas sob diferentes sistemas biofísicos e socioeconômicos. Vários estudos apontam que pesquisas com modelagem vêm sendo utilizadas há vários anos, tentando estudar os aspectos da segurança alimentar frente às mudanças climáticas, gestão de riscos e mitigação em sistemas agrícolas (Wijk et al., 2012).

As previsões agrícolas realizadas com auxílio de modelos de simulação de crescimento e produtividade das culturas despontam como importante ferramenta de planejamento para a agricultura, auxiliando pesquisadores e produtores na gestão dos cultivos. Em conformidade com essa necessidade, surgiu o Modelo APSIM (Simulador de Sistemas de Produção Agrícola), que integra em sua plataforma módulos específicos de solos, clima e matéria seca, permitindo simular o desenvolvimento de órgãos, relação do nitrogênio com a planta, risco climático e práticas de manejo, tornando possível simular o crescimento de plantas submetidas a diferentes manejos (Keating et al., 2003; Holzworth et al., 2018; Bosi et al., 2020).

Ressalta-se que o APSIM é um modelo mecanicista baseado em processos biofísicos capaz de simular o crescimento e desenvolvimento de pastagens (Souza et al., 2022). Por meio do módulo “Crescimento”, disponível no APSIM Classic, em pesquisas realizadas na parametrização do *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça, o APSIM simulou a produção de matéria seca com alta precisão (Araújo et al., 2013).

O lançamento de uma nova versão do modelo, o APSIM Next Generation, (Holzworth et al., 2018), possibilitou desenvolver o modelo APSIM-Pasto Tropical, parametrizado inicialmente para *U. Brizantha* cv. BRS Piatã (Bosi et al., 2020). Ainda em conformidade com o modelo APSIM-Pasto Tropical, Gomes et al. (2020) realizaram uma parametrização simples, utilizando valores de parâmetros obtidos por Pezzopane et al. (2018), para o capim Marandu.

Ainda que os estudos de modelagem sobre plantas forrageiras tropicais e o milho estejam sendo realizados mundialmente, no Brasil, poucos trabalhos foram desenvolvidos. Estudos realizados por Bosi et al. (2020), utilizando o APSIM-Pasto Tropical para simular o crescimento do capim *U. Brizantha*, verificaram que o modelo

é eficiente para o sistema de corte; porém, ainda não é eficiente para o sistema de pastejo (Gomes et al., 2020), o que reforça a necessidade de novos estudos.

Santos (2017), utilizando o módulo APSIM-Milho, observou resultado razoável para variável de crescimento (índice de área foliar), com as melhores observações até 60 dias após a data de semeadura e bons resultados, em alguns casos, até o desenvolvimento final da cultura.

Nos últimos anos, o consórcio milho-braquiária vem se tornando uma realidade tecnológica de integração lavoura-pecuária. Trata-se de uma associação de culturas utilizada para diferentes fins, destacando-se a cobertura de solo, formação de palhada, produção de grãos, silagem ou pasto de braquiária em sucessão, em busca da sustentabilidade da produção, principalmente quando se considera as incertezas climáticas inerentes à atividade agrícola (Ceccon et al., 2013).

Ainda que tenha ocorrido avanços consideráveis na modelagem de pastagens de braquiária e do milho, e considerando a grande importância que o consórcio milho-braquiária tem para o setor agropecuário, sobretudo no sistema de Integração Lavoura Pecuária-ILP, vale ressaltar a ausência de trabalhos que abordam a modelagem do consórcio entre as referidas culturas. É preciso que se tenha a compreensão das interações entre elas e quais alterações ocorrem no crescimento e rendimento em função da competição por fatores climáticos e nutricionais.

Dessa forma, o presente estudo busca entender a dinâmica desses sistemas e a sintetização desses conhecimentos através da utilização de um modelo mecanístico de utilização global, o APSIM. Segundo Bosi et al. (2020), é possível a parametrização e calibração do modelo APSIM-Pasto Tropical e do modelo APSIM-Milho, abrindo a possibilidade de modelagem para o consórcio milho-braquiária (APSIM-Milho Pasto), através da combinação dos referidos modelos.

Desse modo, a hipótese definida é: ainda que as simulações de observações em sistemas consorciados sejam complexas, o APSIM é capaz de capturar as condições de manejo e ambiente neste tipo de sistema. Assim, o presente estudo objetivou parametrizar e avaliar o desempenho do Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM), para a estimativa do crescimento e produtividade de milho e braquiária em sistemas de cultivo solteiro e consórcio milho-braquiária no Norte Piauiense e Leste Maranhense.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma planta pertencente à família Poaceae com ampla distribuição geográfica, com origem na América do Norte e Central, de origem genética no México (SILVEIRA et al., 2015). O milho é uma cultura amplamente cultivada em todo o mundo e possui grande importância socioeconômica e alimentar, notabilizando-se por diversos usos, sobressaindo-se como uma das principais matérias-primas para indústria de alimentos, principalmente humana e animal (Contini et al., 2019; Luz et al., 2020; Cesconetto et al., 2021).

O milho é um produto fundamental para a agricultura brasileira, cultivado em todas as regiões do país, em mais de dois milhões de estabelecimentos agropecuários. A cultura do milho passou por transformações profundas nas últimas décadas, reduzindo-se como cultura de subsistência de pequenos produtores e o aumentando seu papel como agricultura comercial eficiente, com deslocamento geográfico e temporal (Contini et al., 2019).

O milho é considerado uma cultura versátil, encontrando-se em todas as condições edafoclimáticas dos diversos continentes, em função da disponibilidade de cultivares com adaptação específica ambiental. Existem cultivares adaptadas desde altas a baixas altitudes e ampla faixa de latitudes, bem como fotoperíodo de dias curtos e dias longos (Fornasier Filho, 2007). Para expressão de seu máximo potencial produtivo, a cultura requer temperatura alta, algo em torno de 24 e 30° C, radiação elevada e adequada bem como disponibilidade hídrica no solo durante seu ciclo produtivo (Nunes, 2018; Silva et al., 2021). Quanto ao metabolismo fotossintético, o milho pertence ao grupo de plantas C4, caracterizando-se por possuir elevada eficiência fotossintética (Bergamaschi; Matzenauer, 2014).

O Brasil desponta como um dos principais produtores mundiais de milho, porém ainda possui produtividade média inferior à dos EUA e China, ficando em terceiro lugar no cenário mundial. A produtividade média de grãos de milho dos EUA, safra 2022/2023, foi em torno de 10,88 t ha⁻¹, em contraste com a produtividade média do Brasil, safra 2022/2023, em torno de 5,921 t ha⁻¹ (USDA; Conab, 2023). Sugere-se que os rendimentos elevados de produtividades de grãos de milho nos EUA sejam oriundos do melhoramento genético vegetal e práticas agronômicas que atendam às

condições climáticas, permitindo que o potencial máximo de rendimento da cultura seja explorado (Carvalho, 2020).

A região Centro-Oeste é a maior produtora de milho, com área plantada de 11.650,5 milhões de hectares, produção de 77.126,9 milhões de toneladas e produtividade média de aproximadamente 6.620 kg ha⁻¹, representada pelo Estado do Mato Grosso como principal produtor nacional de milho, com 51.240,6 milhões de toneladas. Em seguida, destaca-se o Paraná, na Região Sul, como segundo maior produtor com 18.509,2 milhões de toneladas, enquanto a Região Nordeste responde pela quarta posição nacional, com produção de 11.801,2 milhões de toneladas e produtividade média de 3.591 kg ha⁻¹ (Conab, 2023).

Na Região Nordeste, a Bahia ocupa o primeiro lugar em produção, com 3.928,7 milhões de toneladas, com área de 853,4 milhões de hectares e rendimento de 3.567,0 kg ha⁻¹, seguido pelo Maranhão, com área de 1.900 milhões de hectares, produção de 7.361,8 milhões de toneladas e rendimento de 4.604,0 kg ha⁻¹; e o Piauí, com área de 639,4 milhões de hectares, produção de 2.892,0 milhões de toneladas e rendimento médio de 4.523,0 kg ha⁻¹ (Conab, 2023).

O leste maranhense vem ganhando destaque com a implantação de novas áreas no cenário agrícola; dentre as culturas cultivadas o milho ganha destaque, somando-se aos 1.900 milhões de hectares de área planta no Estado (Conab, 2023). Pesquisas apontam que com uso de tecnologia os baixos rendimentos registrados pelos os órgãos oficiais podem ser superados.

Silva et al. (2016), em pesquisas realizadas em diferentes fazendas no leste maranhense, com a utilização de diferentes genótipos de milho e diferentes sistemas de cultivo, obtiveram rendimentos variando entre 8.180,0 Kg ha⁻¹, em Chapadinha-MA, e 7.490,0 kg ha⁻¹, em Brejo-MA, demonstrando a importância do uso de tecnologias. Melo et al. (2021) relataram que obtiveram rendimentos consideráveis, em torno de 8.051 kg ha⁻¹, utilizando o híbrido simples transgênico de milho PIONER30F53VYHR, com alto potencial produtivo nas condições do Cerrado do leste maranhense.

No estado do Piauí, a cultura é explorada em regime de sequeiro, principalmente na região do Cerrado piauiense, que tem o período chuvoso de novembro a março (Medeiros, 2020), com precipitação média anual variando de 800 a 1400 mm (Andrade Júnior et al., 2004). Porém, os autores enfatizam que, apesar do elevado índice pluviométrico anual, o risco climático a que a cultura do milho está

sujeita é acentuada, em razão da irregularidade na distribuição de chuvas, traduzida por períodos de veranicos de diferentes durações, sobretudo se estes ocorrerem durante as fases mais críticas da cultura (prefloração e enchimento de grãos), quando o estresse hídrico pela falta de água reduz sensivelmente seus rendimentos (Bergamaschi et al., 2006).

Quando o milho é submetido às condições plenas nutricionais e hídricas, sua resposta em termos de rendimento é satisfatória, comprovada por Carvalho et al. (2020), com obtenção de rendimento para o milho em torno 4.800 kg ha^{-1} , em condições de déficit hídrico, e 7.200 kg ha^{-1} , com irrigação plena em ensaio experimental conduzido sob irrigação no município de Teresina-PI, testando diferentes espaçamentos entre linhas e densidade de semeadura, associados a diferentes regimes hídricos.

Os pesquisadores, atualmente, valem-se de novas tecnologias para observarem o crescimento e rendimento das culturas (Asseng et al., 2015; Ferreira, 2018), utilizando modelos de crescimento que possibilitam avaliar diversos genótipos e manejos nas mais variadas condições climáticas. Nesse sentido, Baum et al. (2023), avaliando a capacidade do (APSIM) de simular a resposta da produtividade do milho à entrada de nitrogênio (N) e à rotação de culturas em experimentos de longo prazo, relataram que o modelo simulou adequadamente a resposta do rendimento de grãos ao nitrogênio, com ajuste de R^2 variando entre 0,80 a 0,97 e rendimento médio variando entre 546 a $17.147 \text{ kg ha}^{-1}$, considerando diferentes locais, rotações, taxas de N e anos de cultivo.

Os pesquisadores, atualmente, valem-se de novas tecnologias para observarem o crescimento e rendimento das culturas (Asseng et al., 2015; Ferreira, 2018), utilizando modelos de crescimento que possibilitam avaliar diversos genótipos e manejos nas mais variadas condições climáticas. Nesse sentido, Baum et al. (2023), avaliando a capacidade do (APSIM) de simular a resposta da produtividade do milho à entrada de nitrogênio (N) e à rotação de culturas em experimentos de longo prazo, relataram que o modelo simulou adequadamente a resposta do rendimento de grãos ao nitrogênio, com ajuste de R^2 variando entre 0,80 a 0,97 e rendimento médio variando entre 546 a $17.147 \text{ kg ha}^{-1}$, considerando diferentes locais, rotações, taxas de N e anos de cultivo.

Os estudos de Morel et al. (2020) evidenciaram que o APSIM simulou o crescimento de seis cultivares de silagem de milho em altas latitudes ($>55^\circ$), com

subestimação de grande parte da biomassa acima do solo, com ajuste de dados aceitável demonstrado por um de $R^2=0,87$, porém com baixa precisão ($RMSE=5.200 \text{ kg ha}^{-1}$ e $NRMSE=0,41$), grande dispersão dos dados e valores de previsões variando entre 12.000 a $15.000 \text{ kg ha}^{-1}$, com valores observados variando entre 15.000 e $25.000 \text{ kg ha}^{-1}$.

A análise de crescimento é considerada um método capaz de descrever as condições morfofisiológicas da planta em diferentes intervalos de tempo, entre duas amostragens sucessivas, com base na produção fotossintética avaliada através da matéria seca acumulada (Magalhães, 1979).

Conforme Castro et al. (1984), a determinação da biomassa seca das partições da planta, em geral, exige poucos equipamentos (régua graduada em milímetros, tesouras, paquímetro, estufas de aeração forçada, sacos plásticos, sacos de papel etc.). Dessa forma, isso se torna uma vantagem da análise de crescimento, uma vez que as informações básicas a serem levantadas são a biomassa seca de toda a planta e suas partições além da determinação da dimensão da área foliar, que é o órgão responsável pelo processo fotossintético.

O crescimento vegetal ocorre segundo uma dinâmica de contribuição dos órgãos nos diferentes processos, podendo ser avaliado através de fórmulas matemáticas, permitindo a obtenção de informações em intervalos de tempo regulares. Considerando que os fatores ambientais, tais como luz, temperatura, concentração de CO_2 , disponibilidade de água e nutrientes são próprios de cada local e que a análise de crescimento de plantas deve levar em conta a interação desses fatores com as plantas, tendo em vista que eles afetam sensivelmente a taxa assimilatória líquida, taxa de crescimento relativo, razão de área foliar dos vegetais em geral, torna-se necessário o conhecimento das interações desses parâmetros com cada fator ambiental (Peixoto; Peixoto, 2009).

O estudo desenvolvido por Manfron et al. (2003), intitulado Modelo do índice de área foliar da cultura de milho, objetivou eliminar deficiências operacionais e metodológicas, e facilitar avaliações rápidas e simultâneas do IAF, durante o ciclo da cultura de milho, avaliando três híbridos. Conforme os autores, o IAF apresentou variação temporal até atingir seu pico máximo, variando entre 5 e $8 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$, com decréscimo após as plantas apresentarem senescência foliar, com mesma tendência do desenvolvimento para a variável em questão entre os três híbridos avaliados.

Utilizando graus dias acumulados (GDA) para determinação do IAF, Müller et al. (2005) afirmaram que o IAF apresentou aumento exponencial na fase inicial da cultura, linear e positivo até o pendoamento, com diminuição no início da senescência das folhas, com $6,12 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ de valor máximo.

Zhao et al. (2022), estudando a cultura do milho na China sob diferentes épocas, locais e níveis de nitrogênio, observaram variações não significativas na produtividade de grãos. A biomassa vegetal e o índice de área foliar também apresentaram resultados não significativos entre as cultivares; no entanto, apresentaram resultados significativos entre as diferentes estações. Os referidos autores relataram rendimento de grãos de 11.242 kg h^{-1} com aplicação de 300 kg h^{-1} de N em dose máxima aplicada.

2.2 A cultura da braquiária

O Gênero Braquiária foi fundamental no desenvolvimento da pecuária de corte no Brasil, dando suporte e viabilidade econômica aos criadores de gado bovino, sobretudo com predominância na região dos Cerrados (Keller-Grein et al., 1996; Correa; Santos, 20030).

A braquiária *Urochloa brizantha* ganha destaque na alimentação de bovinos de corte e leite (Souza et al., 2022); e a braquiária Marandu é uma das espécies mais utilizadas na atividade pecuária, dada a sua boa adaptação em climas tropicais, porém a braquiária *Urochloa ruziziensis* também ainda é muito utilizada em sistemas de cultivo por apresentar um bom desenvolvimento radicular (Silva, 2004). A tolerância à fertilidade reduzida é uma das principais características do capim Marandu, além de possuir grande potencial de produção de biomassa de forragem e acentuado valor nutritivo, quando cultivado em solos de média a alta fertilidade (Nunes et al., 1984; Peternelli, 2003). A referida gramínea vem se destacado como uma das plantas forrageiras mais investigadas no Brasil, objetivando identificar respostas a diferentes estratégias de manejo (Braga et al., 2007).

Em geral, o crescimento e a produção de biomassa da braquiária (*Urochloa spp.*), são afetados pelas condições climáticas e manejo adotado. Estudos realizados por Paciullo et al. (2008) e Martuscello et al. (2009) evidenciaram que as plantas do capim-braquiária alongam seus colmos e folhas, sob alto sombreamento, para aumentar sua exposição à radiação solar utilizando a produção de fotoassimilados para esse fim, o que possivelmente causa redução na produção de biomassa.

A altura do dossel das gramíneas forrageiras, em geral, possui relação direta com a interceptação luminosa (Silva, 2004). Contudo, a altura do dossel, além de variar entre as cultivares de uma determinada espécie de plantas, é influenciada fortemente por fatores climáticos, como o fotoperíodo, a temperatura e a luminosidade, assim como pela disponibilidade hídrica e pelos nutrientes; soma-se a isso as características inerentes ao próprio genótipo (Gobbi et al., 2018).

Carrilho et al. (2012), avaliando pastagem com capim *U. decumbens*, sob três níveis de sombreamento artificial (0, 30 e 50%), observaram que a produção de biomassa verde e o número de plantas por hectare não foram afetados; no entanto, nos locais sombreados, as plantas tiveram diminuição na percentagem de matéria seca e incremento na área foliar, o que evidencia alongamento de tecido com gastos de fotoassimilados para esse fim, em detrimento da produção de biomassa.

Bosi et al. (2014) obtiveram resultados semelhantes quando determinaram que a produtividade de forragem e as características biométricas do capim braquiária não são afetadas pelo sombreamento das árvores nas épocas secas e frias; entretanto, foram determinadas pela deficiência hídrica e pela temperatura do ar.

Paciullo et al. (2008), em pesquisa realizada com a braquiária *Decumbens* em três ambientes em termos de radiação solar, observaram aumento nas taxas de alongamento foliar em 13, 117 e 118% no verão, outono e primavera, respectivamente, sob sombreamento de 50%, resultando no aumento da área foliar para compensar a captação de luz em ambiente com reduzida luminosidade, evidenciando mudança de padrão de alocação de fotoassimilados pelas plantas, sugerindo que as pastagens, quando submetidas ao sombreamento seja em qualquer sistema de cultivo, geram respostas na tentativa de compensar a competição por luz.

2.3 Consórcio milho-braquiária

Para o desenvolvimento de sistemas em consórcio, faz-se necessário o conhecimento da competição das espécies por fatores de produção para se obter produtividades satisfatórias da cultura de grãos e da formação e produção de biomassa da pastagem, evitando assim sistemas ineficientes (Kluthcouski; Yokoyama, 2003).

Essa modalidade de sistema em consórcio tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores na região do Cerrado, conforme revisões realizadas por Alvarenga et

al. (2006), observando-se, no geral, boa produtividade de grãos de milho, sugerindo que a forrageira não afeta a granífera de interesse.

Estudos realizados pela Embrapa (2013) mostraram que o consórcio de milho com braquiária tem se tornado uma interessante prática agrícola que vem sendo utilizada em diferentes sistemas de produção, com o objetivo de minimizar os diversos problemas relacionados ao solo, através da sua cobertura com plantas, visando melhorar a capacidade produtiva bem como realizar o estabelecimento de pastagens.

Nos últimos anos, o Sistema de Integração Lavoura-Pecuária (ILP) tem sido impulsionado por meio do consórcio com pastagens tropicais e graníferas. Com isso, o milho (*Zea mays*) e a braquiária (*Urochloa spp.*) estão se destacando no Brasil, nesse tipo de sistema (Almeida et al., 2017).

As frequentes ocorrências de eventos climáticos adversos e a grande diversidade de condições edafoclimáticas interferem no comportamento vegetativo e sobretudo produtivo das culturas, aumentando os riscos nas atividades de agropecuária das diferentes regiões do Brasil, afetando, total ou parcialmente, a produção agrícola.

No Brasil, a adoção do Sistema de Integração Lavoura-Pecuária tem impulsionado o consórcio de milho (*Zea mays*) com plantas forrageiras, sobretudo com braquiária (*Urochloa spp.*) (Almeida et al., 2019). Contudo, o estabelecimento do consórcio do milho com a planta forrageira não pode comprometer a produtividade de grãos; para tanto, o milho deve estar no sistema como planta dominante (Zhang; Li, 2003), evitando, desse modo, que ocorra competição entre as duas espécies, por luz, água, nutrientes e fatores climáticos (Costa et al., 2012). Com isso, algumas medidas de manejo devem ser adotadas, como aplicação de herbicida, conforme Ceccon et al. (2010), além da adoção de espaçamentos adequados e escolha de variedades que tenham boa resposta produtiva.

O sucesso da implantação de sistemas consorciados passa pelo conhecimento sobre a competição das espécies por fatores de produção, para se obter produtividades satisfatórias da cultura de grãos e da formação e produção de biomassa da pastagem, evitando, assim, sistemas ineficientes (Kluthcouskil; Yokoyama, 2003). Corroborando os resultados apresentados por Strieder et al. (2008), nesse mesmo contexto, Alves et al. (2013) relataram que os componentes morfológicos do milho são afetados pelo tipo de híbrido e pelo sistema adotado com plantas forrageiras em consórcio.

A modalidade de sistema em consórcio tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores na região do Cerrado, conforme revisões realizadas por Alvarenga et al. (2006) e Euclides et al. (2010), observando-se, no geral, boa produtividade de grãos de milho, sugerindo que a forrageira não afeta significativamente a granífera de interesse.

Ceccon et al. (2018), objetivando avaliar a produtividade de grãos e de massa de milho, solteiro e consorciado com populações de plantas de duas espécies de *Braquiária brizantha* cv. Marandu e Ruziziensis, relataram que o incremento populacional de plantas de braquiária promove aumento do rendimento de massa. Todavia, reduz a produtividade de massa do milho. Ainda, segundo os mesmos autores, o aumento de plantas de braquiária por metro quadrado promove uma queda de rendimento de grãos no milho consorciado, com o melhor rendimento de grãos de 6.200 kg ha⁻¹ e 5.800 kg ha⁻¹, com população de 10 plantas m⁻², em consórcio com a braquiária brizantha cv. Marandu e Ruziziensis, respectivamente.

No mesmo viés, Oliveira et al. (2022), objetivando avaliar o desempenho agrônomo do milho (*Zea mays*), em cultivado solteiro e consorciado com *Urochloa Ruziziensis*, submetido a diferentes tipos de solos e manejo, relataram que o milho solteiro superou em 14,3% a massa do milho consorciado. Porém, no tratamento com a reinoculação de *Azospirillum brasilense* no solo argiloso, o milho consorciado produziu 16,3% mais massa seca que o solteiro. Por outro lado, o milho cultivado em sistema consorciado com a braquiária com reinoculação de *Azospirillum Brasiliense*, no solo argiloso, produziu cerca de 8.144 kg ha⁻¹ de massa seca contra 5.263 kg ha⁻¹ no solo arenoso sem inoculação. Os autores relataram que o tipo de solo interfere na produção de biomassa das culturas por não apresentarem na maioria das vezes as condições de fertilidades natural e estrutura para atender a necessidade de desenvolvimento das culturas; com isso, o uso de tecnologia é determinante no incremento de biomassa em sistemas consorciados.

Pesquisando a cultura do milho e capim Marandu solteiro e consorciados, em diferentes anos e ambientes na Região Sudeste do país, Oliveira et al. (2020), observaram que o sistema de cultivo não afetou a produtividade do milho; no entanto, relataram diferença de rendimento médio entre os locais e anos, variando entre 7.300 e 10.800 kg ha⁻¹. Por outro lado, a braquiária foi afetada significativamente quanto ao rendimento de massa seca quando submetida ao consórcio com milho, ainda que tenha ocorrido incremento de rendimento, comparando os anos de cultivo com registro

de 10.000 kg ha⁻¹ massa seca de forragem no sistema solteiro contra 5.000 kg ha⁻¹ em cultivo consorciado.

Em pesquisa realizada por Souza et al. (2024), por meio de meta-análise, levando em conta as diferentes regiões brasileiras, os autores observaram que a consorciação de milho com capim braquiária diminuiu a produtividade do milho em 5,6% e da braquiária em 64%, destacando fatores agronômicos e ambientais como causa da queda de rendimento. No entanto, a época de semeadura e o clima foram determinantes no desempenho dos sistemas de cultivo consorciado.

2.4 Modelagem do crescimento e produtividade de culturas agrícolas

Os modelos de simulação de culturas são ferramentas importantíssimas para os estudos das interações e mudanças no clima e os seus efeitos sobre os diversos cultivos e os possíveis impactos dessas mudanças nas condições ambientais sobre a produtividade (Asseng et al., 2015).

A realização de previsões agrícolas de forma antecipada ao plantio, baseando-se em técnicas de previsão numérica agrometeorológica, ajudam nas tomadas de decisões na agricultura, minimizando os riscos. Dessa forma, a produtividade, como variável dependente, pode ser determinada por meio de modelos matemáticos, utilizando-se dados de monitoramento agrometeorológico. Os modelos consideram que cada elemento climático influencia na produtividade da cultura, interferindo como um fator de eficiência (Silva et al., 2011).

A modelagem de sistemas agrícolas é descrita como um conjunto de representações matemáticas ou de equações que buscam expressar as relações que ocorrem num sistema agrícola real, correlacionando os dados obtidos. As equações descrevem e simulam exatamente as interrelações e complexidade entre os componentes envolvidos, fornecendo ferramentas confiáveis para estimar eventos físicos, químicos e biológicos (Ferreira, 2018).

Modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas baseados em processos podem contribuir no monitoramento e na previsão de produtividade assim como auxiliar na compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas da cultura ao ambiente bem como nas tomadas de decisão (Marin et al., 2011).

Os modelos de culturas ajudam o esclarecimento e a avaliação das relações das várias dimensões entre os fatores que afetam as culturas (Dokoohaki et al., 2016). Esses fatores incluem data de plantio, seleção de cultivares, densidade de

semeadura, tipo de solo, estratégias de fertilizantes, irrigação e padrões climáticos sazonais.

Atualmente, inúmeros modelos estão disponíveis para prever o crescimento das culturas, contudo, alguns modelos têm ganhado destaque na simulação de culturas anuais (Ovando et al., 2018). O APSIM (Simulador de Sistemas de Produção Agrícola) é uma plataforma, cuja estrutura consiste em um modelo mecanístico composto por módulos interconectados, desenvolvidos para simular processos biofísicos em agroecossistemas (Keating et al. 2003; Holzworth et al. 2014; Holzworth et al., 2018). Tendo em vista a importância do tema e alguns problemas existentes com a aplicação dos modelos de previsão de rendimento em sistemas agrícolas, justifica-se a necessidade da realização de estudos mais aprofundados quanto à modelagem em sistemas agrícolas, notadamente para o consórcio milho-braquiária na região Centro-Norte Piauiense e Leste Maranhense, nas quais o consórcio tem sido bastante adotado pelos produtores.

2.5 Parametrização, calibração e validação de modelos

A modelagem de sistemas agrícolas requer uma série de etapas para correta descrição, pelo modelo, das relações que ocorrem num sistema agrícola real, correlacionado com os dados obtidos, para estimar os eventos físicos, químicos e biológicos (Ferreira, 2018).

A utilização do modelo APSIM precisa cumprir, a priori, algumas etapas, a exemplo da parametrização, calibração e validação. A parametrização é o processo de atribuição de valores aos parâmetros do modelo em função da cultura a ser modelada, com posterior calibração dos valores dos parâmetros do modelo, buscando os melhores ajustes de dados simulados com relação aos dados observados com a precisão e exatidão desejadas; por fim, a validação consiste na verificação do modelo calibrado para aferir se ele é capaz de reproduzir as observações medidas em condições diferentes das usadas para a calibração do modelo (Bosi et al., 2020).

Recentemente, diversos estudos têm investigado a capacidade do modelo APSIM, em simular o crescimento e o rendimento de pastagens tropicais e milho em diversos cenários climáticos (Gomes et al., 2020; Bosi et al., 2020; Feitosa, 2021; Balcão, 2021; Souza, et al., 2022); entretanto, ainda que as pesquisas tenham apontado simulações satisfatórias, esses autores sugerem alguns ajustes e novas pesquisas para sanar algumas inconsistências por parte do modelo.

Objetivando a Parametrização do modelo APSIM para simulação do crescimento do capim Marandu, desenvolvido por Gomes et al. (2020), que analisaram a capacidade do modelo simular com precisão o crescimento de forragem de pastagens em sistema de pleno sol e em condições de sombreamento contrastantes de ambiente silvipastoril. Os resultados obtidos demonstram que o modelo simulou, de forma satisfatória, a biomassa viva de forragem e as partições, com resultados para biomassa viva com muito boa precisão e boa exatidão $R^2=0,83$, e $NSE=0,75$; enquanto as estimativas nos diferentes níveis de sombreamento apresentaram precisão muito boa, R^2 entre 0,82 e 0,89, acurácia variando de boa a muito boa, NSE entre 0,66 e 0,84) e erros pequenos com RMSE entre 610 a 390 kg ha⁻¹, com valores próximos aos observados para situação a pleno sol. A massa foliar foi simulada com satisfatória precisão e exatidão, R^2 variando entre 0,83 e 0,90 e NSE entre 0,75 e 0,83 para todos os sistemas. A simulação para massa do caule foi satisfatória para o sistema a pleno sol, com $R^2=0,83$ e $NSE=0,75$ e, para os sistemas sombreados, com precisão boa com R^2 variando de 0,68 a 0,83 e exatidão satisfatória a muito boa, com NSE de 0,56 a 0,80, demonstrando que o modelo é capaz de simular o crescimento de pastagens tropicais de forma confiável.

Segundo Santos et al. (2020), em estudo realizado com uma variedade de milho em duas regiões do Estado de Alagoas, Nordeste do Brasil, para determinar o desempenho do modelo APSIM em crescimento e produtividade de milho e a dinâmica da água no solo, o modelo mostrou-se confiável. O IAF variou no espaço e no tempo com maior amplitude para o município de Rio Largo, com 5,41 cm² cm⁻², aos 57 dias após a semeadura (DAS), e 3,64 cm² cm⁻² para o município de Arapiraca, aos 65 dias após a semeadura (DAS), com R^2 variando entre 0,68 a 0,96 e NSE entre 0,95 e 0,87 para os dois locais da simulação, respectivamente. Os autores também relataram que o modelo APSIM estimou a produção de biomassa em Arapiraca com RMSE de 3.110 Kg ha⁻¹, com subestimação acima de 20% para todas as épocas de semeadura, porém com boa precisão $R^2=0,86$; e, em Rio Largo, foram simuladas com $R^2=0,82$ e RMSE de 2.630 kg ha⁻¹. Com relação ao rendimento de grãos, as simulações foram satisfatórias em Arapiraca, com erro variando entre 12,9% e 15,5%, no entanto, o modelo superestimou em torno de 42% as simulações em Rio Largo para as três primeiras épocas de semeadura.

Bosi et al. (2020), relataram que o APSIM simulou a massa viva da forragem sob irrigação e sequeiro com muito boa precisão, com R^2 variando entre 0,89 e 0,94 e

muito boa exatidão com NSE de 0,88 a 0,92 e um RMSE de 620,3 kg ha⁻¹. Por outro lado, as estimativas do IAF forneceram simulações de insatisfatórias a boas, com R² variando entre 0,56 e 0,78, e NSE = -2,08 e 0,55. No entanto, os autores concluíram que o modelo APSIM-Pastagem Tropical é capaz de simular o crescimento de pastagens tropicais sob várias condições ambientais, porém, as simulações sob pastejo devem ser melhoradas para contabilizar as perdas de biomassa durante e após o pastejo, devido aos danos causados por animais, indicando assim a importância de testar o modelo em outros locais com condições de clima, solos e intensidades de pastejo ou corte, objetivando obter melhor precisão e confiança no planejamento e na tomada de decisões em sistemas silvipastoril.

O estudo desenvolvido por Feitosa (2021), na parametrização e validação do modelo APSIM- Pasto Tropical, para simulação do crescimento do capim *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça, em condição irrigado e sequeiro, apresentou os melhores resultados com ajustes principais no valor do coeficiente de extinção de luz (k), área foliar específica padrão (AFE) e eficiência de uso da radiação (RUE) para planta inteira, com boa performance na simulação de massa de forragem viva, com R² variando entre 0,64 a 0,93, NSE entre 0,61 a 0,90 e RMSE variando entre 695,6 a 1792,9 kg ha⁻¹. No entanto, o mesmo autor relatou que o modelo ainda necessita de ajustes na simulação da partição de fotoassimilados, ao efeito de diferentes doses de N no crescimento da pastagem e da área foliar específica AFE.

Souza et al. (2022) relataram que o APSIM simulou a biomassa viva de forragem de forma satisfatória, com R²=0,75 e 0,84, massa de folha com R²=0,86 e 0,86 e o IAF com R²=0,80 e 0,75, em sistema sequeiro e irrigado, respectivamente. Por outro lado, o APSIM apresentou melhor eficiência com NSE de 0,65 apenas para variável folha e as demais variáveis foram simuladas de forma insatisfatória, de acordo com esse índice.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Parametrização do modelo APSIM no ambiente de Teresina-PI

3.2 Dados experimentais e caracterização da área

Os dados experimentais utilizados para parametrizar o modelo APSIM foram obtidos em ensaio conduzido na Embrapa Meio-Norte, em Teresina-PI, coordenadas geográficas (05°05' S; 42°48' W e 74,4 m), no período de junho a setembro de 2021 (Figura 1).

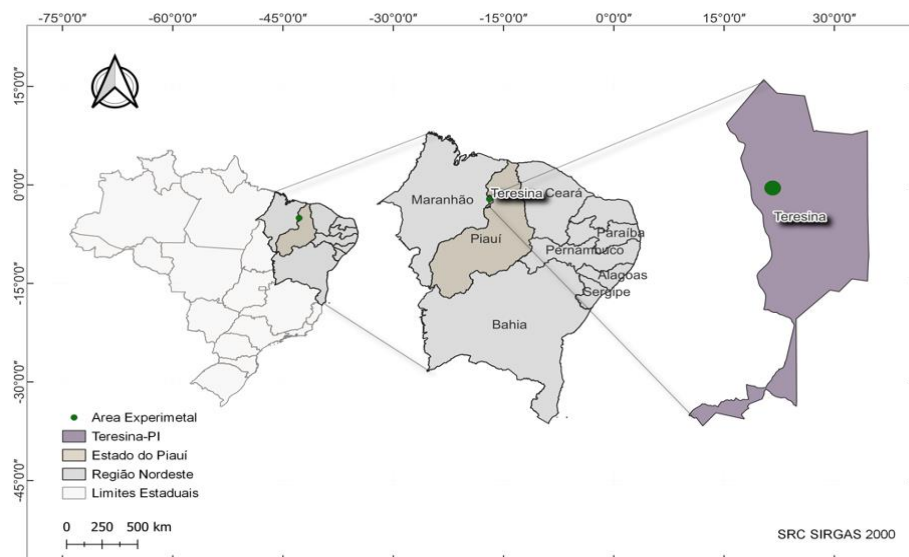


Figura 1 Localização do Estado do Piauí. Área Experimental, Embrapa Meio-Norte, Teresina-Piauí, Brasil.

O clima da região, segundo a classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955), é C1sA'a', caracterizado como subúmido seco, megatérmico, com excedente hídrico moderado no verão, com temperatura média anual de 28,5°C e precipitação anual média de 1.318 mm (Bastos; Andrade Júnior, 2019).

Foram realizadas coletas de amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,2m, 0,2-0,4m e 0,4-0,6m, para análise química e posterior correção da fertilidade do solo. O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Melo; Andrade Júnior; Pessoa, 2014). As características químicas do solo da área experimental são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 Características químicas do solo da área experimental, Embrapa Meio Norte, Teresina-Piauí (2021)

Prof. (m)	pH (Água)	MO g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Na	H+Al	CTC	V
										(%)
0,00 - 0,20	6,31	7,5	35,03	0,14	1,06	0,38	0,01	1,26	2,85	55,79
0,20 - 0,40	6,61	5,3	17,25	0,14	1,14	0,43	0,02	1,10	2,83	61,13
0,40 - 0,60	6,65	4,8	15,10	0,14	1,13	0,50	0,02	1,34	2,30	59,39

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Meio-Norte.

A correção do solo foi realizada por ocasião do preparo do solo, com aplicação de 1500 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico de forma mecanizada, 20 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), 30 kg ha⁻¹ de fósforo e 60 kg ha⁻¹ de potássio (K₂O) (DE MELLO PRADO, 2020).

Os dados climáticos com relação aos registros de precipitação (mm), temperatura do ar (°C), (Figura 2), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s⁻¹), radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹), foram obtidos da base de dados da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Teresina-Piauí, ano de 2021. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) interceptada pela cultura do milho consorciado com capim braquiária foi obtida por meio de barra PAR de referência (SQ 316, Apogee, Logan, Utah, EUA), localizada acima do dossel do milho e ao nível do solo para medir a radiação absorvida pelo sistema, disposta nas entrelinhas da cultura, além de uma outra barra PAR que acompanhou o crescimento do capim braquiária consorciado com milho, sempre posicionada acima do dossel do capim e abaixo do dossel do milho, para capturar a radiação que foi transmitida do dossel do milho até a braquiária.

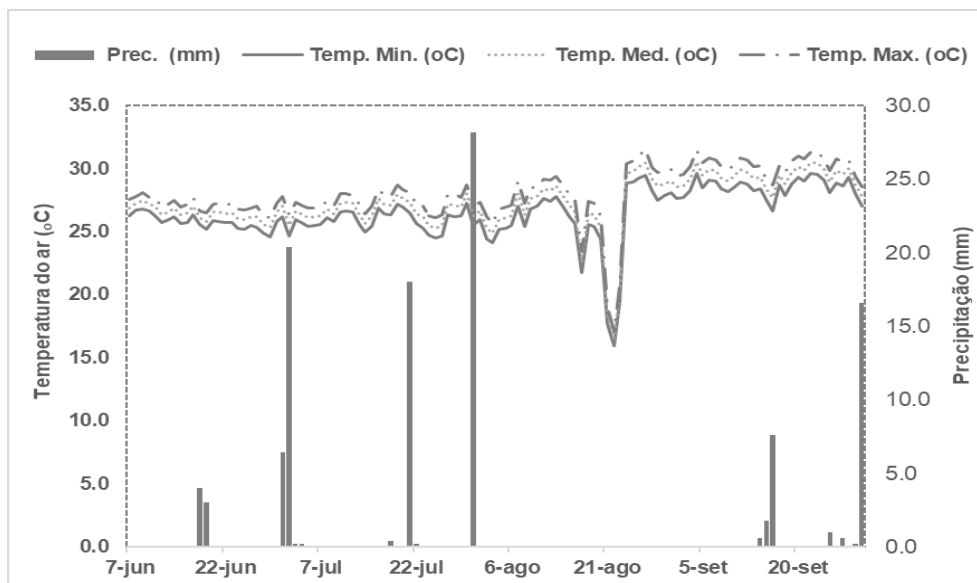


Figura 2 Valores de temperatura do ar e precipitação, referentes ao período de 7 de junho a 29 de setembro de 2021, obtidos da estação automática, INMET, Teresina-Piauí, Brasil

O ensaio experimental foi conduzido sob irrigação, considerando os sistemas de plantio para ambas as cultivares, (milho solteiro, braquiária solteira e consórcio milho-braquiária). O milho cultivado foi o híbrido BM-709 PRO e o capim foi a *Brachiaria Urochloa cv. Ruziziensis*, para ambos os sistemas de cultivo. A semeadura do milho e capim braquiária foi realizada em 7 de junho de 2021. O milho foi semeado no espaçamento de 0,5 m entre linhas, com 4,6 plantas m^{-1} (densidade de 92.000 mil plantas ha^{-1}) e a semeadura da braquiária foi realizada a lanço na proporção de 7 kg ha^{-1} , respectivamente. Realizou-se uma adubação de cobertura na área com a cultura do milho solteiro, braquiária solteira e milho-braquiária, aos 18 dias DAE, nas proporções de 130 kg ha^{-1} de nitrogênio (N) e 50 kg ha^{-1} de FTE BR12.

A irrigação foi realizada por meio do sistema aspersão convencional, distribuído na área em espaçamento de (12m x 12m). O manejo de irrigação baseou-se na reposição da evapotranspiração diária da cultura do milho (ETc). Para tanto, utilizou-se o método de Penman-Monteith, para a estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), e valores de coeficientes de cultura (Kc) da FAO para o milho (Allen et al., 1998). Para obtenção da evapotranspiração de referência (ETo), tomou-se como base os dados da estação do INMET (2021) de Teresina-PI.

O monitoramento do conteúdo de água no solo ocorreu através de coletas semanais por meio da instalação de sensores (TDR – CS616, Campbell Sci., Logan,

Utah). A lâmina total de irrigação aplicada foi 525,4 mm (irrigação+precipitação), obtida por sistemas automáticos de aquisição de dados (CR1000 – Campbell Sci.).

Os sensores foram instalados em três repetições na área experimental, nas profundidades de 0,0-0,3m; 0,3-0,6m, 0,6-0,9m e 0,9-1,2m. Para determinação das características físico-hídricas do solo e determinação da curva de retenção (Tabela 2), foram coletadas amostras nas profundidades de 0-0,2m, 0,2-0,4m e 0,4-0,6m, (Bosi et al., 2020).

Tabela 2 Características físico-hídricas do solo da área experimental. Embrapa Meio Norte, Teresina-Piauí, Brasil (2021)

Características	Camadas do solo (m)		
	0,0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,32	1,45	1,50
Areias (g kg^{-1})	63,73	62,04	64,71
Silte (g kg^{-1})	22,12	20,29	13,21
Argila (g kg^{-1})	14,15	17,67	22,08
CC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,24	0,29	0,29
PM ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,05	0,06	0,10

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Meio-Norte.

Os ensaios experimentais foram distribuídos em três áreas com dimensões de 12m x 120m, para o milho solteiro; 12m x60 m para a braquiária solteira e 12 x60 para o consórcio milho-braquiária (Figura 3).

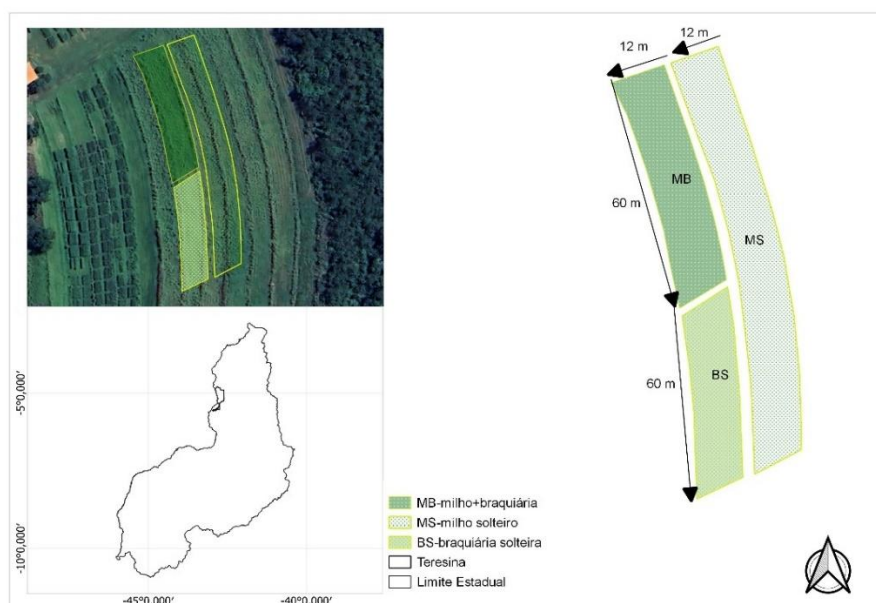


FIGURA 3 Área Experimental, Embrapa Meio-Norte, Teresina-Piauí, Brasil. Disposição do ensaio experimental em campo

3.3 Determinação dos parâmetros biométricos

Para obtenção da biomassa seca acima do solo das culturas de milho e capim braquiária, procedeu-se com coletas destrutivas de plantas, iniciadas 28 dias após a semeadura (DAS), que seguiram com intervalos de 14 dias até a ocorrência da maturação fisiológica do milho (118 DAS), totalizando sete coletas ao longo do ciclo das culturas de milho e braquiária solteiro e em consórcio (28, 43, 58, 73, 88, 103, 118 DAS). Considerando as culturas do milho e capim braquiária, determinou-se os parâmetros massa seca total acima do solo (Mst, em g), massa seca total de material vivo acima do solo (Mst, em g), massa seca de folha viva (Msf, em g), massa seca de folha morta (Msfm, em g), massa seca de colmo vivo (Msc, em g), massa seca de colmo morto (Mscm em g), área foliar (AF, em cm²) e índice de área foliar (IAF, cm² cm⁻²). Por ocasião do surgimento dos órgãos reprodutivos, determinou-se, ainda para cultura do milho, a massa seca de grãos (Msg, em g), massa seca de raques (Msr, em g) e massa seca de palha (Msp, em g).

Delimitaram-se uma área para obtenção das amostras destrutivas e outra área para determinação de rendimento final de grãos de milho e rendimento final de biomassa seca de capim braquiária. As amostras de plantas de milho foram realizadas com a moldura posicionada 1m na linha de milho e 0,5m posicionada no sentido da entre linha de forma centralizada. As plantas de braquiária foram coletadas cortando-se todas as plantas dispostas dentro da moldura rente ao solo. Utilizou-se uma moldura de 0,5m² (0,5m x 1m), disposta aleatoriamente nos locais de coleta, em quatro repetições, durante as sete coletas realizadas. Para ambas as culturas, foi feita a determinação em campo das alturas de cinco plantas diferentes, para cada uma das quatro repetições de coletas.

Logo após, levou-se cada coleta de plantas ao laboratório de Ecofisiologia da Embrapa Meio-Norte, para determinação da biomassa seca total (Mt) e da massa seca de partições (Mp). O material foi levado à estufa com circulação de ar forçada a 65°C até peso constante. Inicialmente pesou-se todo o material verde colhido na moldura (0,5m²) e separadas subamostras de milho com 2 plantas de milho e 10 de plantas de braquiária solteiros e do consórcio, para determinação da biomassa das partições, respectivamente.

As plantas de capim braquiária foram fracionadas em partes por órgãos reprodutivos, tais como folha e colmo, e as plantas de milho, em folha, colmo, além de palha, grãos e ráquis, conforme ocorrência. Antes da secagem de folhas, mediu-

se a área foliar das plantas representativas da amostra, utilizando-se um integrador de área foliar LI-3100 (Licor Inc., Lincoln, EUA).

A partir da área foliar (AF), calculou-se o índice de área foliar (IAF), através da relação entre a AF (cm^2) da amostra de plantas e a superfície correspondente do terreno (cm^2), referente a cada uma das quatro amostras coletadas. Determinou-se a área foliar específica (AFE, $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$) para o capim braquiária solteiro e consorciado através da relação entre a área foliar da amostra de folhas verdes e a respectiva massa seca da amostra. Igual procedimento utilizou-se para a determinação da área foliar específica (AFE, $\text{mm}^2 \text{ g}^{-1}$) do milho solteiro e consorciado. Uma vez determinadas a massa seca total (Mt) e a massa seca de partições (Mp), extrapolou-se a massa seca para 1m^2 para todas as amostras de partições. Os dados médios dos parâmetros biométricos, em cada uma das coletas (aos 28, 43, 58, 73, 88, 103 e 118 DAS), foram considerados como dados de entrada no modelo APSIM.

3.4 Métodos de entrada no modelo APSIM

O modelo APSIM, inicialmente, necessitou de dois arquivos de entrada principais para iniciar a simulação, os quais se constituem de dados meteorológicos diários e de solo, formatados de acordo com a exigência do modelo. Os dados do arquivo meteorológico utilizados foram: temperatura média anual (t_{av} , $^{\circ}\text{C}$), amplitude térmica anual (Δt , $^{\circ}\text{C}$), dados diários de temperatura do ar máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$), precipitação (mm), radiação solar (MJ m^{-2}), além de dados de posicionamento geográfico (latitude e longitude, em graus). Os dados utilizados na criação dos arquivos meteorológicos foram obtidos da estação meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), correspondente ao município de Teresina-Piauí. O arquivo de solo foi elaborado através do APSOIL, o qual é constituído de submódulos. No submódulo “Water”, inseriram-se dados das características físico-hídricas (densidade do solo, conteúdo de água do solo na saturação, conteúdo de água do solo na capacidade de campo e conteúdo de água do solo no ponto de murcha permanente, dentre outros) (Tabela 3).

Tabela 3 Parâmetros físico-hídricos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo APSIM. BD=densidade aparente, AirDry=solo seco ao ar, LL15=limite inferior ou ponto de murcha permanente a -15 bar, DUL=limite superior drenado ou capacidade de campo, SAT=limite de solo saturado, KL=coeficiente de extração de água, XF=fator de exploração da raiz, SWCON=fração de água acima do DUL que escoar por dia

Prof. (cm)	Características físico hídricas do solo							SWCON) (dia)
	BD	Ar seco	LL15	DUL	SAT	KL	XF	
	g cm ⁻³	mm mm ⁻¹	mm mm ⁻¹	mm mm ⁻¹	mm mm ⁻¹	fração d ⁻¹	0-1	
0-10	1,320	0,040	0,050	0,260	0,360	0,050	1,000	0,90
10-20	1,450	0,060	0,070	0,270	0,380	0,050	1,000	0,90
20-30	1,680	0,090	0,100	0,240	0,310	0,020	1,000	0,90
30-40	1,580	0,100	0,110	0,240	0,300	0,050	1,000	0,90
40-50	1,420	0,122	0,122	0,240	0,290	0,040	1,000	0,90
50-60	1,420	0,122	0,122	0,240	0,290	0,040	1,000	0,90
60-70	1,420	0,135	0,135	0,235	0,280	0,030	1,000	0,90
70-80	1,420	0,142	0,142	0,245	0,280	0,040	1,000	0,90
80-90	1,420	0,144	0,144	0,238	0,270	0,030	1,000	0,90
90-120	1,420	0,140	0,140	0,230	0,280	0,030	1,000	0,30

O submódulo “SoilWat” é um modelo de balanço hídrico que requer parâmetros específicos para o cálculo dos componentes do balanço de água no solo, os quais foram mantidos (Probert et al., 1998; Huth et al., 2012; Bosi et al., 2020). O submódulo “SoilOrganicMatter” apresenta os dados referentes à matéria orgânica do solo, os quais foram mantidos valores do modelo. No submódulo “Chemical”, foram inseridos os dados da composição química do solo, nos itens “carbono orgânico” e “pH” obtidos das análises químicas do solo da área experimental Tabela 4, e nos demais itens mantidos valores do modelo. Por fim, o submódulo “Fertiliser” considera o nitrogênio inicial contido no solo, em que os valores foram utilizados (Probert et al., 1998; Bosi et al., 2020).

Tabela 4 Parâmetros químico-orgânicos utilizados na criação do arquivo de solo no modelo

Prof. Cm	NO ₃ ppm	NH ₄ Ppm	CO %	FBIOM (0-1)	FINERT (0-1)	FOM Kg ha ⁻¹	pH (Água)
0-10	9,00	10,00	2,000	0,025	0,300	40,590	6,310
10-20	9,00	10,00	1,600	0,020	0,370	34,936	6,610
20-30	7,00	8,00	1,400	0,015	0,450	30,070	6,650
30-40	7,00	8,00	1,100	0,010	0,500	25,881	6,650
40-50	5,00	6,00	1,000	0,010	0,600	22,276	6,650
50-60	5,00	0,02	0,800	0,010	0,800	19,173	6,650
60-70	5,00	0,02	0,600	0,010	0,950	14,204	6,650
70-80	2,80	0,02	0,400	0,010	0,950	10,522	6,650
80-90	2,80	0,02	0,400	0,010	0,950	2,348	6,650
90-120	2,80	0,02	0,400	0,010	0,950	2,349	6,650

3.5 Estrutura APSIM - Pastagem Tropical

O modelo APSIM-Tropical Pasture é uma versão desenvolvida recentemente por Bosi et al., (2020), para o APSIM Next Generation Holzworth et al. (2018), usando o APSIM Plant Modeling Framework (PMF), descrito por (Brown et al., 2014). No entanto, para obtenção de melhores previsões, ainda é preciso alguns ajustes e calibração de seus parâmetros para cada espécie ou cultivar de interesse. Os quatro submodelos de órgãos (folha, caule, raiz e órgãos de armazenamento) calculam as demandas de biomassas estrutural e não estrutural e nitrogênio (N), as quais são particionadas pela mediação do crescimento diário e absorção de nitrogênio (N), (Brown et al., 2014).

O submodelo folha calcula a área foliar específica (AFE), levando em conta idade e déficit hídrico; o índice de área foliar (IAF), tomando como base a área foliar específica (AFE) e a massa foliar; radiação interceptada (RI) e fotossíntese, que estimará a massa seca (MS) particionada entre os órgãos da planta. Os submodelos fornecem funções para modificar a partição, senescência, realocação e retranslocação, baseando-se em diversos fatores, como idade da planta, comprimento do dia, os quais estão associados às fases fenológicas da cultura.

O submodelo de Órgãos de Armazenamento no APSIM-Tropical Pasture é usado para descrever as estruturas reprodutivas no dossel de gramíneas, além de simular estolões ou rizomas de espécies que os possuem (Brown et al., 2014).

Em geral, a estrutura desses modelos de cultura incorpora métodos para prever a fenologia da cultura, desenvolvimento do dossel, eficiência na captura e uso de recursos (luz, água, nitrogênio) e regras de arbitragem para assimilação, alocação e redistribuição de nitrogênio (N) entre os órgãos. O nitrogênio (N) não estrutural e a matéria seca (MS) são divididos em metabólicos e de armazenamento.

O modelo APSIM-Pasto Tropical tem como principal função calcular o crescimento, o uso de recurso e os fluxos de matéria orgânica do capim e, em seguida, enviar os resultados para outros modelos no APSIM.

O Modelo de fenologia no APSIM-Pasto Tropical, que simula o desenvolvimento da gramínea, é mediado por sucessivas fases de desenvolvimento, em que cada fase é limitada por estágios de crescimento distintos em função de um fotoperíodo crítico. A estrutura do submodelo fenológico possui oito fases, a saber: germinação, emergência, juvenil, vegetativa 1, reprodutiva 1, reprodutiva 2, reprodutiva 3 e vegetativa 2. As fases germinação, emergência, juvenil e vegetativo 1 são mediados pelo tempo termal. O início e o fim das três fases, reprodutiva1; reprodutiva 2; reprodutiva 3 e a Vegetativa 2, são mediados pelo fotoperíodo, assim, uma função (Fotoperíodo) foi adicionada ao modelo para calcular o fotoperíodo; e uma função Fotoperíodo Delta para identificar se o fotoperíodo está aumentando ou diminuindo, considerando se a planta é de dia longo ou de dia curto. Uma função “GoToPhase”, ao término da fase Vegetativa 2, orienta que a simulação deve retornar para a fase Vegetativa 1, possibilitando uma simulação cíclica em pastagem perene já estabelecida.

Os demais cálculos para simulações de processos de água, nitrogênio (N) e matéria orgânica de superfície são realizados pela estrutura de modelagem APSIM, utilizando os módulos padrão SoilWat, SoilN e SurfaceOM (Probert et al., 1998).

O módulo MicroClimate calcula a evapotranspiração de referência (Snow e Huth, 2004), usando a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998); e o manejo de cultura e de irrigação é descrito em script nos módulos “Operations” e “IrrigationSchedule”, respectivamente.

Os parâmetros do modelo SoilWat considerados são o limite inferior (LL15) assumido como a menor umidade do solo após um longo período sem adição de água, limite superior drenado (DUL), densidade do solo (BD) determinada para cada camada de 0,1 m até 1,2 m de profundidade, (Tabelas 3). A concentração mínima e ótima de

nitrogênio (N) nos órgãos da planta foi ajustada, baseando-se no efeito do nitrogênio simulado do solo nos cálculos de crescimento da pastagem (Bosi, et al., 2020).

3.6 Estrutura do APSIM - Milho

O módulo APSIM-Maize simula o crescimento da cultura de milho em intervalo de tempo, através de uma estrutura funcional que responde aos dados de entrada (dados de cultura) e clima (temperatura, precipitação e radiação), abastecimento de água do solo (módulo soilwat) e nitrogênio do solo (módulo soilN).

A estrutura de desenvolvimento do modelo de simulação APSIM-Milho (Brown et al., 2015) tem por base o APSIM-Plant Modeling Framework (Brown et al. 2014), composta por diversos módulos. O módulo de Arbitragem é responsável pela alocação de matéria seca e nitrogênio em cada órgão da planta, mediando a divisão dessa matéria seca em estrutural, metabólica e de reserva.

O módulo Fenologia é responsável pela simulação do desenvolvimento da planta mediante 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).

O módulo Estrutura calcula o desenvolvimento estrutural da planta, incluindo o número de primórdios, folhas, colmos e nós, além da altura da planta. Grão: usa um modelo genérico para os componentes reprodutivos da planta e calcula a produtividade, tomando como base o número de grãos e o seu tamanho. Raiz: calcula o crescimento das raízes ao longo do perfil do solo, acúmulo de biomassa radicular e densidade de comprimento das raízes, possui ainda funções para cálculo da demanda de matéria seca e nitrogênio (N), absorção de nitrogênio (N) e água.

O módulo folha é um modelo genérico que calcula o tamanho das folhas, o efeito do estresse hídrico na divisão celular e expansão delas, além da fotossíntese. Os módulos Palha, Ráquis e Colmo simulam o acúmulo de matéria seca na palha da espiga, o crescimento da ráquis, o crescimento do colmo, respectivamente, além do módulo que calcula a matéria seca viva ou morta de cada órgão, relacionados à parte aérea, sistema radicular, ou da planta toda (Brown et al., 2015).

A estrutura do modelo fenológico possui onze estágios mediados pelo tempo térmico diário (graus dia, GD), baseado na temperatura do ar e no fotoperíodo, em que o estágio fenológico atual corresponde ao tempo térmico acumulado (graus dia,

GD). Já o estágio fenológico correspondente ao período entre a semeadura e a germinação é determinado em função da umidade do solo, porém, os outros estágios fenológicos são calculados em função do tempo térmico.

As fases fenológicas são: (i) Germinando – compreende da semeadura à germinação; (ii) Emergindo – compreende da germinação à emergência; (iii) Juvenil – compreende da emergência ao fim do período juvenil; (iv) Fotossensível – compreende do fim da fase juvenil ao início da floração; (v) Folha Aparente – compreende o início da floração ao aparecimento da folha bandeira, continuando até que a folha final do caule termine sua expansão; (vi) Folha Bandeira-Floração – vai da folha bandeira à floração; (vii) Floração-Início de Grãos – vai da floração até o início do enchimento de grãos; (viii) Enchimento de Grãos – do início da formação do grão ao fim da formação do grão; (ix) Maturação – compreende do final da formação do grão à maturação; (x) Maturação-Colheita – compreende o início da maturação fisiológica à colheita; (xi) Pronto de Colheita – compreende a fase final da fenologia e a fase em que não ocorre mais nenhuma modificação na cultura até que seja realizada a colheita (Brown, et al., 2015).

Ressalta-se que os cálculos para simulações de processos de água, nitrogênio (N) e matéria orgânica de superfície são realizados conforme descrito na estrutura do APSIM - Pasto Tropical (Probert et al., 1998; Snow & Hut, 2004). O manejo de cultura e irrigação é descrito em script, nos módulos “Operations” e “IrrigationSchedule”, respectivamente (Bosi, et al., 2020).

3.7 Estrutura do APSIM – Milho/Pastagem Tropical.

Uma vez parametrizados e estruturados o modelo “APSIM-Pasto Tropical” e o Modelo do milho “APSIM-Milho”, estes formaram um único arquivo, com a inserção dos submodelos “Maize” e “Tropical Pasture” no módulo “Replacements”, estruturando assim o modelo consórcio milho-braquiária, “APSIM-Milho Pasto Tropical”. Em seguida, foi inserido, no módulo “Validation”, um submódulo denominado “Consórcio MB”, vinculando o submódulo “Soil” e o submódulo “Water”. O manejo do milho e da pastagem foram vinculados nos submódulos “Operations” e “IrrigationSchedule”; além disso, foram inseridos no submódulo “Report” todos os parâmetros de fenologia, de clima e solo para as culturas do milho e capim braquiária cultivados em consórcio, respectivamente. Com a ação de vinculação dos submodelos, todos os elementos de

clima e solo serviram às duas culturas em concomitância, simulando desta forma a competição interespecífica entre as culturas por radiação; fertilidade e água.

3.8 Parametrização do APSIM – Pastagem Tropical

Utilizaram-se os dados obtidos no ensaio conduzido em Teresina-PI, em regime irrigado, para a parametrização do modelo do capim braquiária *Urochloa ruziziensis* (APSIM-Pasto Tropical), em cultivo solteiro, tomando como base inicial da parametrização os valores dos parâmetros de Bosi et al. (2020). Inicialmente, substituímos no modelo os valores de coeficiente de extinção (k), eficiência do uso da radiação (RUE) pelos valores doravante encontrados neste estudo. Os valores de temperatura base (Tb) e temperatura ótima (To) foram utilizados conforme Souza, et al. (2022). A temperatura média (Tm) foi determinada utilizando os valores observados no período do experimento, Figura 2.

Estimou-se o coeficiente de extinção (k), a partir da porcentagem de interceptação da radiação e do índice de área foliar (IAF) do capim Braquiária *Urochloa cv. Ruziziensis* produzida sob irrigação em experimento realizado na Embrapa Meio-Norte, utilizando uma adaptação da Lei Beer-Lambert, conforme a metodologia utilizada por Bosi et al. (2020). O coeficiente de extinção (k) foi calculado para cada data de coleta das amostras de plantas, utilizando-se a Eq. (1), em que o (I) é a interceptação da radiação (%). Depois calculou-se a média entre os valores para uso nas simulações do modelo APSIM.

$$K = - \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{I}{100}\right)}{LAI} \right] \quad (1)$$

Estimou-se a eficiência do uso da radiação (RUE), a partir da biomassa da matéria seca do capim Braquiária *Urochloa cv. Ruziziensis*, com a radiação solar interceptada (RGi) pelo dossel da planta e um fator de correção para a temperatura do ar (Ft), conforme Bosi, et al. (2020). Pegou-se os valores obtidos pela barra PAR de referência colocada acima do dossel menos os valores obtidos pela barra PAR colocada junto ao solo. O produto da radiação global pelo percentual de PAR interceptada resultou a radiação solar global interceptada (RGi). A eficiência do uso da radiação (RUE_{PAR}) foi determinada entre a relação do acúmulo de forragem e a quantidade corrigida de PAR interceptada (Parlcorr), conforme a Eq. (3), resultando uma regressão linear. Na referida equação, (ParI) é a quantidade total de PAR

interceptada e (Ft) é um fator de temperatura. Obteve-se o (ParI), através da soma da quantidade medida de PAR interceptada acima do dossel, e o (Ft) através da divisão da unidade pelo produto da temperatura base e temperatura ótima, conforme Souza, et al. (2022).

$$ParI_{corr} = ParI \times Ft \quad (2)$$

A segunda etapa da parametrização consistiu na inserção de operações de manejo ao modelo APSIM-Pasto Tropical para simular o experimento. As informações inseridas foram semeadura, adubação, irrigação e biomassa seca de partições para cada corte, aos (28, 43, 58, 73, 88, 103 e 118 DAS), além de dados de radiação, umidade no solo e competição por invasoras, para simular a competição interespecífica.

A terceira etapa da parametrização consistiu na calibração dos parâmetros do modelo para o capim Braquiária em sistema de cultivo solteiro, em um processo de tentativa e erro, até que os valores estimados apresentassem o melhor ajuste possível com os valores observados das variáveis: Biomassa seca total (Bt, g m⁻²), Biomassa seca total de material vivo (Bst, g m⁻²), Massa seca de folha (Msf, g m⁻²), Massa seca de colmo (Msc, g m⁻²), Índice de área foliar (IAF).

O processo de tentativa e erro consistiu em buscar os melhores ajustes dos parâmetros avaliados levando em conta a data de ocorrência de todos os eventos fenológicos da cultura do milho, tais como a diferenciação apical; ocorrência da folha bandeira; emissão do sistema floral; antese e maturação fisiológica, levando em conta as partições de biomassa.

3.9 Parametrização do APSIM – Milho

Os dados meteorológicos e da cultura do milho utilizados para parametrização do modelo APSIM-Milho foram obtidos em experimento realizado em regime irrigado, em cultivo solteiro, na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina-Piauí, Figuras 1 e 2. Primeiramente, utilizou-se os dados observados no presente trabalho para a parametrização do modelo APSIM-Milho, tomando como base inicial da parametrização os valores dos parâmetros de Bosi et al. (2020), referente ao Híbrido BM-855 PRO2.

A segunda etapa da parametrização consistiu na inserção de operações de manejo ao modelo APSIM-Milho para simular o experimento. As informações inseridas

foram semeadura, adubação, irrigação e biomassa seca de partições para cada corte, aos 28, 43, 58, 73, 88, 103 e 118 DAS, além de dados de radiação PAR e umidade do solo. Consideraram-se, na semeadura, a população observada de 4,6 plantas m^{-2} , profundidade de semeadura 5 cm e espaçamento entre linhas de 0,5 m.

A terceira etapa da parametrização consistiu na calibração dos parâmetros do modelo para o milho em cultivo solteiro, em um processo de tentativa e erro, até que os valores estimados obtivessem o melhor ajuste possível para os valores observados das variáveis: biomassa seca total (B_t , g m^{-2}), biomassa seca total de material vivo (B_{st} , g m^{-2}), biomassa seca folha viva (M_{sf} , g m^{-2}), biomassa seca de colmo vivo (M_{sc} , g m^{-2}), índice de área foliar (IAF) e área foliar específica (AFE, $\text{mm}^{-2} \text{g}^{-1}$), além de massa seca de palha (M_{sp} , g m^{-2}), massa seca de ráquis (M_{sr} , g m^{-2}), massa seca de grãos (M_{sg} , g m^{-2}), conforme ocorrência e desenvolvimento no decorrer do ciclo fenológico da cultura, seguindo protocolo de monitoramento (Bosi et al., 2020). O processo de tentativa e erro consistiu em ajustar os valores dos parâmetros fenológicos e os valores de fotoperíodo em conformidade com todas as observações realizadas em campo.

3.10 Parametrização do APSIM - Milho/Pastagem Tropical

A parametrização do modelo de cultivo do milho consorciado com a braquiária (APSIM-Milho/Pastagem Tropical) tomou como base inicial toda a estrutura de parametrização do modelo do milho (APSIM-Milho) e do modelo do capim braquiária (APSIM-Pasto Tropical), os quais foram juntos em uma mesma estrutura do Modelo APSIM. Em seguida, foram inseridos os dados de clima obtidos na estação meteorológica na área experimental da Embrapa Meio-Norte, em Teresina-Piauí, Figuras 1 e 2.

A etapa seguinte consistiu na inserção de operações de manejo ao Modelo APSIM-Milho/Pastagem Tropical para simular o experimento. As informações inseridas foram semeadura, adubação, irrigação e biomassa seca de partições para cada corte, aos 28, 43, 58, 73, 88, 103 e 118 DAS, além de dados de radiação PAR e umidade do solo da área do consórcio.

As informações de semeadura, adubação e irrigação foram inseridas no módulo “Soil” e submódulos “Operations” e “IrrigationSchedule”. No submódulo “Operations” inserimos as informações de semeadura e adubação e no submódulo “Operations” as informações de irrigação e precipitação. Os dados de observações de umidade do

solo, partição de biomassa e radiação PAR observada, foram inseridas através da importação de dados em uma planilha de Excel.

Os dados físico-hídricos do solo e químicos foram inseridos no mesmo módulo para as duas culturas (milho-braquiária), para simular uma possível competição. Foram inseridos no módulo solo, em seus respectivos submódulos, os dados de manejo adotados no consórcio (milho-braquiária), (semeadura, adubação e irrigação), para simular a competição pelos mesmos fatores.

4 Parametrização do modelo APSIM no ambiente de Brejo-MA

4.1 Dados experimentais e caracterização da área

Os dados utilizados para parametrizar o modelo foram obtidos em área de produção que adota o sistema de Integração Lavoura Pecuária-ILP, localizada na Fazenda Barbosa, município de Brejo, MA, coordenadas geográficas (03°41' S; 42°58' W e 99 m), no período de fevereiro a junho de 2022 (Figura 3).

O município tem faixa de abrangência geográfica na região do Matopiba com temperatura média do ar variando em torno de 26,28 °C e precipitação de 1502,75 mm (Oliveira et al., 2023). O clima da região do estudo é do tipo Aw', tropical com duas estações bem definidas: a estação chuvosa, entre os meses de dezembro a junho, e a estação seca, entre os meses de julho a novembro, conforme classificação de Köppen & Gerger (1928).

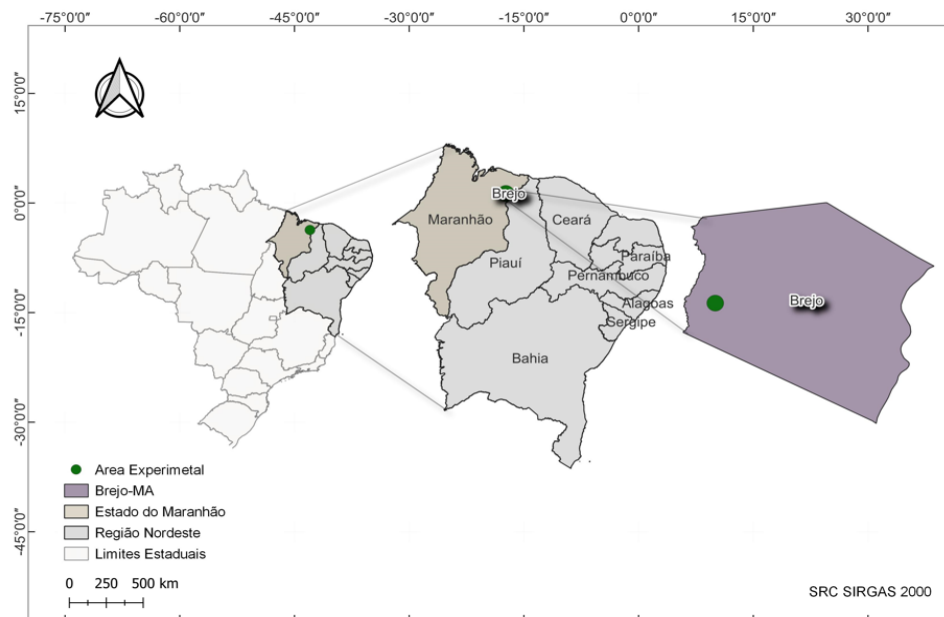


Figura 4 Localização do Estado do Maranhão. Fazenda Barbosa, município de Brejo, Maranhão, Brasil

Inicialmente foram realizadas coletas de amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,2m e de 0,2-0,4m, para análise química e posterior correção da fertilidade e acidez do solo. A correção da acidez foi realizada por ocasião do preparo do solo de forma mecanizada, com aplicação de $1,0 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (88% PRNT) e $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de gesso. O solo da área foi classificado como Argissolo Amarelo distrófico, textura franco-arenosa, e o bioma da região é classificado tipo Cerrado (Resende et al., 2014). As características químicas do solo da área experimental são apresentadas na (Tabela 5).

Tabela 5 Características químicas do solo da área experimental, Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil (2022)

Prof.	pH	MO	P	K	Ca	Mg	Na	H+Al	CTC	V
(m)	(Água)	g kg^{-1}	mg dm^{-3}		 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$					(%)
0,0 - 0,2	6,00	21,1	17,80	0,05	0,89	0,45	0,01	2,73	4,12	34,00
0,2 - 0,4	5,36	4,5	17,25	0,03	0,29	0,16	0,01	2,51	4,01	21,00

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Meio-Norte.

A semeadura do milho solteiro, braquiária solteira e milho-braquiária ocorreu dia 4 de fevereiro de 2022, seguindo protocolo da Fazenda Barbosa, sob a gestão dos proprietários e da equipe de campo da própria fazenda.

Por ocasião da semeadura, realizou-se uma adubação com aplicação de 340 kg ha^{-1} da formulação 12-32-00. Para o milho, aos 7 DAE, foi realizada a primeira adubação de cobertura com 200 kg ha^{-1} do formulado 10-00-30 NPK. A segunda adubação de cobertura foi realizada aos 30 DAE, com o uso de 200 kg ha^{-1} do formulado 10-00-30 NPK.

As variáveis climáticas foram monitoradas durante todo o experimento por meio de uma estação meteorológica instalada na área delimitada para coleta de dados experimentais. Obtiveram-se os registros de precipitação (mm), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) (Figura 4), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m s^{-1}), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). A temperatura média do ar foi de $26,9^{\circ}\text{C}$, média das máximas de $33,8^{\circ}\text{C}$ e das mínimas de $22,8^{\circ}\text{C}$ e a precipitação do período foi de 794 mm. Os referidos dados que caracterizaram as condições climáticas da área experimental, referentes ao período de condução do experimento de fevereiro a junho de 2022, estão apresentados na Figura 5.

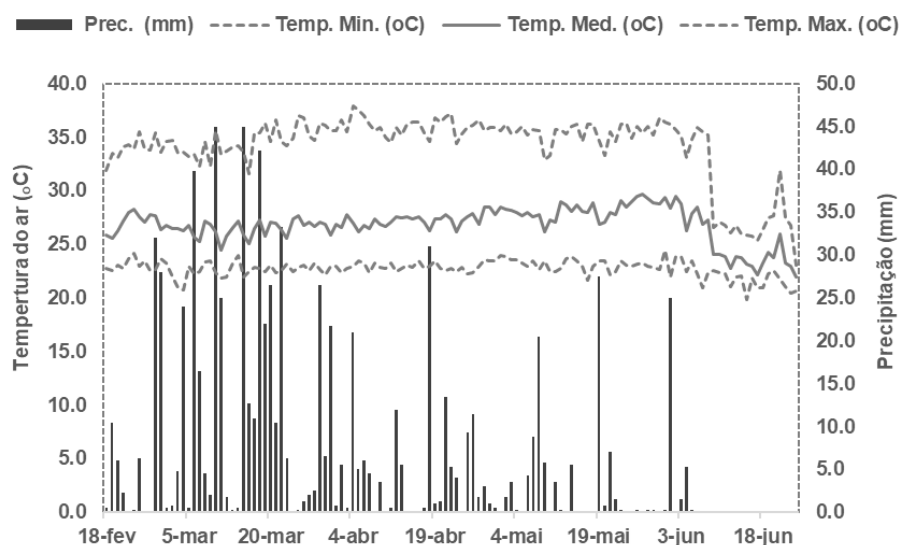


Figura 5 Valores de temperatura do ar e precipitação referentes ao período de 18 de fevereiro a 24 de junho de 2022, obtidas da estação automática, instalada na Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) interceptada pelas culturas foi obtida por meio de barras (PAR) de referência localizada acima do dossel e barras PAR instaladas ao nível do solo, nas entrelinhas da cultura, além de uma outra barra PAR que acompanhava o crescimento do capim braquiária consorciada com milho. A barra PAR utilizada para medir a radiação não interceptada pelo milho e que acompanhava o crescimento do capim braquiária era elevada acima do dossel das plantas de braquiária de maior altura para medir a quantidade de radiação interceptada pelo dossel da planta de capim braquiária a cada 7 dias.

O ensaio experimental foi conduzido sob regime de sequeiro, considerando-se os sistemas de plantio para ambas as cultivares (milho solteiro, braquiária solteira e consórcio milho-braquiária). O monitoramento do conteúdo de água no solo ocorreu por meio da instalação de sensores de umidade CS616 (Campbell Sci., Logan, Utah), obtidos por sistemas automáticos de aquisição de dados CR1000 (Campbell Sci.). Os sensores foram instalados na área com milho solteiro, braquiária solteira e consórcio milho-braquiária, nas profundidades de 0,0-0,3m; 0,3-0,6m e 0,6-0,9m. Para determinação das características físico-hídricas do solo e determinação da curva de retenção característica, foram coletadas amostras nas profundidades de 0,0-0,2m, 0,2-0,4m e 0,4-0,6m, conforme Bosi et al. (2020), (Tabela 6).

Tabela 6 Características físico-hídricas do solo da área experimental. Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil, 2022

Características	Camadas do solo (m)		
	0,0 - 0,2	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,49	1,60	1,63
Areias (g kg^{-1})	77,17	72,46	-
Silte (g kg^{-1})	15,59	19,57	-
Argila (g kg^{-1})	7,24	7,97	-
CC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,26	0,24	0,22
PM ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,10	0,08	0,08

Fonte: Laboratório de Solos da Embrapa Meio-Norte. CC: capacidade de campo PM: ponto de murcha.

Os ensaios experimentais foram delimitados em faixas com dimensões de 12mx100m, cultivadas com milho solteiro, braquiária solteira e milho-braquiária em consórcio, **Figura 6**.

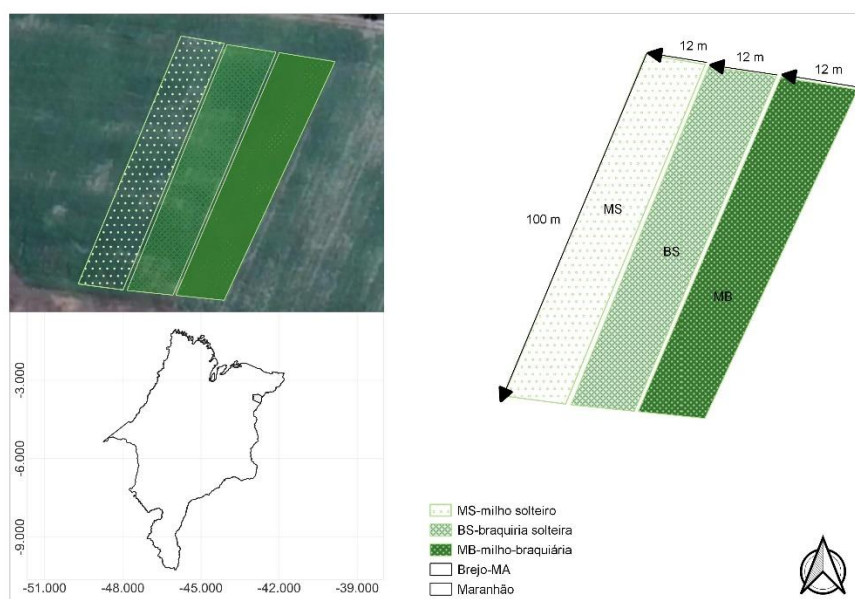


Figura 6 Área Experimental, Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil. Disposição do ensaio experimental em campo

O milho foi semeado de forma mecanizada, com espaçamento de 0,5m entre linhas, com 4 plantas m^{-1} , e a semeadura da braquiária foi realizada através de uma distribuidora de sementes mecanizada. O estande total de plantas de milho foi estabelecido com aproximadamente 80.000 plantas ha^{-1} , enquanto que para o capim braquiária foram utilizados 6 kg ha^{-1} de sementes. O milho cultivado nos sistemas solteiro e consorciado foi o híbrido MS 3845 Status-P3845VYHR (Pioneer®

sementes). A braquiária, em cultivo solteiro e consorciado com o milho, foi a *Urochloa brizantha* cv. *Marandu*.

O controle fitossanitário, nas faixas experimentais com milho solteiro e consorciado, foi realizado com calda composta por fungicida Cercobin® (1kg ha⁻¹), inseticida (300 ml ha⁻¹), Exclusive (adubo foliar), 200 ml ha⁻¹ do óleo mineral Iharol e redutor de pH TA35 25 ml ha⁻¹, além de uma aplicação aérea à base de Piori extra 300 ml ha⁻¹, Proclaim® 200 g ha⁻¹, Nomolt 250 ml ha⁻¹, Engeo Pleno 250 ml ha⁻¹, Iharol 200ml ha⁻¹ e 50 ml ha⁻¹ redutor de pH TA50. Na área com braquiária consorciada com milho, foi aplicada, aos 15 dias após a semeadura (DAS), o herbicida Nicossulfuron Nortox® (200 ml ha⁻¹), 36 Atrazina FACERO® SC (3L ha⁻¹) e 50 ml ha⁻¹ de redutor de pH TA35. O herbicida Nicossulfuron Nortox® (200 ml ha⁻¹) foi aplicado com o intuito de suprimir o crescimento da forrageira, para que não houvesse competição interespecífica e queda de rendimento do milho. Em seguida, foi realizada uma segunda aplicação com Proclaim® 200ml ha⁻¹, Nomolt 250 ml ha⁻¹, Perito 970 SG 200ml ha⁻¹, Piori XTRA® 300 ml, 200 ml ha⁻¹ do óleo mineral Iharol e 50 ml ha⁻¹ do redutor de pH TA50. É importante ressaltar que o manejo adotado para todas as culturas seguiu o padrão adotado pelo produtor da Fazenda Barbosa.

4.2 Determinação dos parâmetros biométricos

As amostras para obtenção da biomassa seca acima do solo das culturas de milho e braquiária foram obtidas por meio de coletas destrutivas de plantas, iniciadas 27 dias após a semeadura (DAS) e seguiram com intervalos de 14 dias até a ocorrência da maturação fisiológica (94 DAS), totalizando 7 coletas ao longo do ciclo das culturas de milho solteiro, braquiária solteira e milho-braquiária consorciados (27, 41, 53, 66, 80, 94, 108, DAS). Considerando as culturas do milho solteiro, braquiária solteira e milho-braquiária consorciados, determinaram-se os parâmetros massa seca total acima do solo (Mt, em g), massa seca total de material vivo acima do solo (Mst, em g), massa seca de folha viva (Msf, em g), massa seca de folha morta (Msfm, em g), massa seca de colmo vivo (Msc, em g), massa seca de colmo morto (Mscm, em g) e área foliar (AF, em cm²), índice de área foliar (IAF), respectivamente. Por ocasião do surgimento dos órgãos reprodutivos, determinaram-se ainda, para cultura do milho solteiro e milho consórcio, a massa seca de grãos (Msg, em g), massa seca de raques (Msr, em g) e massa seca de palha (Msp, em g). As amostras de plantas de milho foram realizadas com a moldura posicionada 1m na linha de milho e 0,5m posicionado

no sentido da entrelinha, de forma centralizada. As plantas de braquiária foram coletadas cortando-se todas as plantas dispostas dentro da moldura rente ao solo. Utilizou-se uma moldura de $0,5\text{m}^2$ ($0,5 \times 1\text{m}$) disposta aleatoriamente nos locais de coleta, repetindo-se a ação 4 vezes, durante as sete coletas realizadas. Com o auxílio de uma trena, determinou-se a alturas de 5 plantas diferentes em cada uma das 4 repetições de coletas, por data de coletas realizadas.

Logo após, levou-se cada coleta de plantas ao laboratório de Ecofisiologia da Embrapa Meio-Norte, para determinação da biomassa total (Mt) e biomassa seca de órgãos vivos das plantas (partições). O material foi levado à estufa com circulação de ar forçada a 65°C até peso constante. Inicialmente, pesou-se todo o material verde colhido na moldura ($0,5\text{m}^2$), em seguida, separadas subamostras de milho solteiro e consórcio com 2 plantas e 10 de plantas de braquiária solteiros e do consórcio, respectivamente, para determinação da biomassa das partições.

As plantas de capim braquiária foram fracionadas em partes por órgãos reprodutivos, tais como folha e colmo; e as plantas de milho fracionadas em folha, colmo, além de palha, grãos e ráquis, por ocasião da ocorrência destes. Antes da secagem de folhas de plantas de milho e braquiária, determinou-se a área foliar das plantas representativas da amostra, utilizando-se um integrador de área foliar LI-3100 (Licor Inc., Lincoln, EUA).

A partir da área foliar (AF), calculou-se o índice de área foliar (IAF), através da relação entre a AF (cm^2) da amostra de plantas e a superfície correspondente de terreno (cm^2), referente a cada uma das 4 amostras coletadas. Determinou-se, a partir da relação entre a área representativa da amostra de massa seca e da massa seca da amostra, a área foliar específica (AFE, $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$) para o capim braquiária. Igual procedimento utilizou-se para determinação da área foliar específica do milho (AFE, $\text{mm}^2.\text{g}^{-1}$). Uma vez determinado a massa seca total e massa seca de partições, extrapolou-se a massa seca para 1m^2 para todas as amostras de partições. Tomando como base os dados obtidos em cada coleta, determinou-se uma média para cada parâmetro, levando-se em conta as 7 coletas realizadas aos (27, 41, 53, 66, 80, 94, 108, DAS), as quais foram consideradas como dados de entrada no modelo APSIM.

4.3 Avaliação do modelo APSIM

Na avaliação do desempenho do modelo para os ensaios instalados na Embrapa Meio Norte, Teresina, Piauí e na Fazenda Barbosa no município de Brejo,

Maranhão, a acurácia e precisão quanto às estimativas realizadas, foram aferidas utilizando-se seis índices:

a) Regressão linear entre os valores observados (O) e previstos (P) de cada variável e o respectivo coeficiente de determinação (R^2), classificado como insatisfatório ($R^2 \leq 0,6$), satisfatório ($0,6 < R^2 \leq 0,7$), bom ($0,7 < R^2 \leq 0,8$) e muito bom ($R^2 > 0,8$) (Bosi et al., 2020);

b) A Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é uma medida adimensional que descreve a exatidão do modelo (Eq. 5) e foi classificado como insatisfatório ($NSE \leq 0,5$), satisfatório ($0,5 < NSE \leq 0,65$), bom ($0,65 < NSE \leq 0,75$) e muito bom ($NSE > 0,75$) (Moriasi et al., 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

c) Erro médio (ME) (Eq.6) foi utilizado como indicador de viés nas simulações:

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (4)$$

d) Erro absoluto médio (MAE) (Eq.7):

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad (5)$$

e) Utilizou-se a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) (Eq. 8) para mensurar a performance geral do modelo e sintetizar a diferença média entre os valores observados e previstos. O modelo é melhor ajustado quando a RMSE se aproxima de zero (Loague; Green, 1991).

$$RMSE = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2\right]} \quad (6)$$

f) Utilizou-se Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE) (Eq. 9), para indicar subestimativa (desvio negativo) e superestimativa (desvio positivo), entre os valores simulados e observados (Tojo Soler, 2004). No presente estudo, a acurácia do modelo é considerada excelente quando $NRMSE < 10\%$; bom se $10\% \leq NRMSE < 20\%$; razoável se $20\% \leq NRMSE < 30\%$; e ruim se $NRMSE \geq 30\%$ (JAMIESON et al., 1991; HEINEMANN et al., 2012).

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{M}} * 100 \quad (7)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parametrização do modelo APSIM

5.1.1 Braquiária Ruziziensis solteira

Os dados de radiação solar e água disponível total, camada 0 a 1,2 m, observados e previstos no presente estudo em escala diária, obtidos em regime solteiro do capim braquiária, são apresentados nas (Figuras 7a e 7b).

Os valores diários máximo e mínimo de radiação solar observados entre a germinação e a colheita ficaram em torno de 19,30 e 2,24 MJ m⁻², respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos previstos pelo modelo APSIM foram 19,31 e 0,33 MJ m⁻², respectivamente (Figura 7a). As variações nos valores de radiação solar são em função do desenvolvimento vegetativo da braquiária, demonstrando que o aumento de área foliar aumenta a quantidade de radiação solar absorvida. Os menores valores de interceptação da radiação solar ocorreram aos 30 DAE, a partir deste intervalo de tempo até os 45 DAE, houve um incremento na interceptação de radiação com tendência de pouca variação (Figura 7a).

A tendência de aumento gradual nos valores de interceptação de radiação é coincidente com o incremento nos valores de IAF observados e preditos (Figura 8d), sustentando que os maiores valores de interceptação de radiação solar pelo dossel da planta tem relação com o aumento do IAF, tendo em vista que é uma das variáveis morfogênicas e estruturais do dossel que determinam a capacidade de interceptação da radiação solar pelo dossel da pastagem (Gastal & Lemaire, 2015).

Os dados de radiação simulados seguiram o mesmo padrão dos dados observados; porém, com registro de subestimação no início da simulação, ajustando-se em seguida ao longo de toda a série de dados previstos e observados (Figura 5a). Devido a infestação da área por ervas daninhas no início do desenvolvimento vegetativo da braquiária, os dados da área foliar observada não representaram a radiação solar observada naquele instante, daí a hipótese de a subestimação ocorrer devido o modelo seguir a fisiologia da cultura conforme observações em campo.

Os valores diários, máximo e mínimo de água disponível no solo, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 183,6 e 170,5 mm, na camada de 0-1,2m, equivalente a 1,53 e 1,42 mm cm⁻¹, respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos de água disponível no solo, previstos pelo modelo APSIM, ficaram em torno de 182,5 e 151,9 mm, equivalentes a 1,52 e 1,26 mm cm⁻¹, respectivamente (Figura 7b).

A simulação de água no solo seguiu o mesmo padrão de dados observados; porém, no início da simulação, o modelo subestimou a umidade, logo em seguida, ajustaram-se aos dados observados (Figura 7b), sugerindo que o modelo simulou a água no solo em função do desenvolvimento radicular da cultura, considerando a fase fenológica no momento da observação em campo dos dados de água disponível no solo. Em trabalho realizado por Matse et al. (2023), o APSIM também forneceu dados de umidade do solo com tendência de semelhança entre os dados simulados e observados.

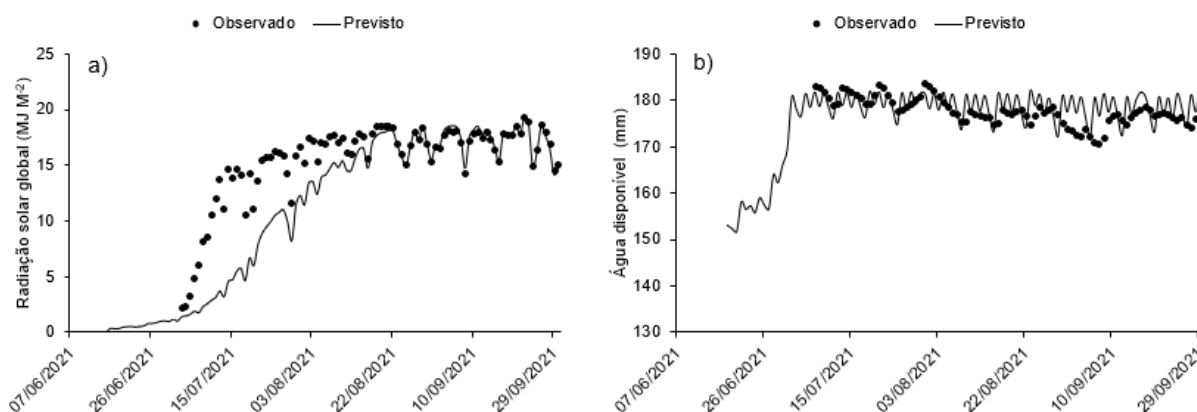


Figura 7 Variação da radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observada e estimada, utilizada na parametrização do capim braquiária *Ruziziensis* cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado em ensaio experimental, realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

Os valores de fotoperíodo crítico para mudanças de fases da cultura, ajustados conforme as diferentes partições de biomassa (folha, caule, raiz e órgãos de reserva), estão descritos na (Tabela 7). Os valores críticos de fotoperíodo para mudanças entre as fases vegetativa e reprodutiva foram ajustados de acordo com as observações da fenologia em nossos experimentos. Posteriormente, ajustou-se a partição de fotoassimilados entre os órgãos da planta considerando cada fase fenológica.

O tempo termal foi o principal mediador da germinação à fase juvenil, enquanto a idade da planta foi o principal impulsionador das frações de partição (Bosi, 2020). A partir da fase vegetativa para fase reprodutiva, a partição de biomassa foi mediada pelo fotoperíodo. O fotoperíodo induziu a mudança de fase quando reduziu a duração do dia de 13,0 para 12,5 h e permaneceu até o fotoperíodo de 10,7 h. A partição de Ms para a folha teve um incremento de 38 para 55% em contraste com a partição de Ms de caule, que variou com decréscimo de 58 a 34%, e leve incremento na partição de MS de raiz, variando de 3 a 19% da fase vegetativa-1 até a fase reprodutiva-3,

respectivamente, sugerindo forte influência do fotoperíodo na fisiologia do capim braquiária (Tabela 7).

TABELA 7 Frações da partição estrutural de acordo com as fases fenológicas da planta e respectivo fotoperíodo crítico indicador de mudança de fase, calibrados para capim braquiária *Ruziziensis*, produzido em sistema de cultivo solteiro, avaliado entre junho e setembro de 2021, em Teresina-Piauí, Brasil

Nº	Fase fenológica	Duração do dia (horas)	Particionamento			
			Folha	Colmo	Raiz	Órgãos
0	Germinação	-	0,50	0,35	0,10	0,05
1	Emergência	-	0,50	0,35	0,10	0,05
2	Juvenil	-	0,38	0,58	0,03	0,01
3	Vegetativo 1	13,0	0,38	0,58	0,03	0,01
4	Reprodutivo 1	12,5	0,55	0,42	0,03	0,00
5	Reprodutivo 2	11,4	0,55	0,35	0,10	0,00
6	Reprodutivo 3	11,0	0,55	0,34	0,11	0,00
7	Vegetativo 2 ^a	10,7	0,55	0,25	0,19	0,01

^a Após a fase Vegetativa 2, um mecanismo “GoToPhase” muda a simulação para a fase Vegetativa1 gerando uma simulação cíclica para pastagens perenes estabelecidas.

A base de parâmetros do capim Piatã, definida por Bosi et al. (2020), utilizada inicialmente na parametrização do modelo APSIM-Tropical Pasture, não foi suficiente para obtenção de bons resultados dos parâmetros analisados para o capim Braquiária *Ruziziensis*, evidenciando a necessidade de mudança de parâmetros. Assim, foram necessários ajustes nos principais parâmetros do submodelo folha, que determinaram os cálculos de crescimento da planta, inserindo no modelo a eficiência do uso da radiação RUE obtida com valor de 2,5 g MJ⁻¹ (Figura 8).

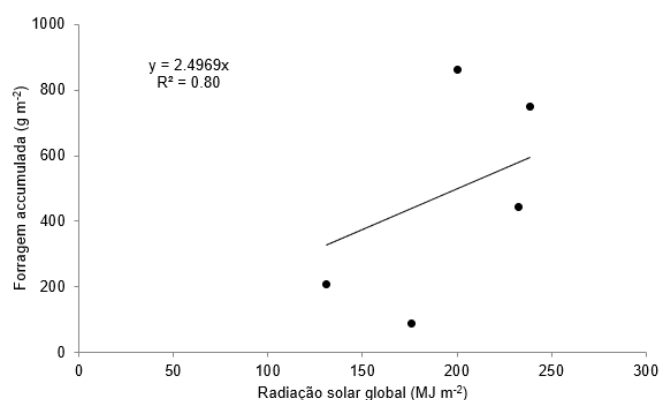


Figura 8 Regressão linear entre acúmulo de forragem (g m⁻²) e radiação solar global interceptada (MJ m⁻²) para capim braquiária *Ruziziensis*, avaliado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

A eficiência do uso da radiação (RUE) da planta inteira, admitindo 20% dos fotoassimilados direcionados ao desenvolvimento radicular, foi ajustado de 1,44 para 1,56 g MJ⁻¹; o coeficiente de extinção luminosa (k) foi ajustado de 0,65 para 0,67; além do acréscimo de um coeficiente de extinção padrão (Tabela 8). A área foliar específica padrão (AFE) foi ajustada de 0,020 para 0,025 m² g⁻¹ (Tabela 6). Ainda no submodelo folha, foi ajustado o parâmetro Tb de 8,9 para 10,8°C, conforme Souza et al. (2021) e as temperaturas ótimas permaneceram sem alteração (TO₁ e TO₂ em 30 e 35°C), respectivamente, conforme Bosi et al. (2020), sugerindo, desse modo, haver similaridade na exigência térmica entre as braquiárias Piatã e Ruziziensis e elasticidade quanto à tolerância às faixas de temperaturas para o desenvolvimento pleno da planta.

No submodelo de caule, não houve mudança nos valores de parâmetros, permanecendo em conformidade com os obtidos por Bosi et al. (2020) para calibração do capim Piatã, sugerindo que o modelo APSIM não é sensível à alocação de biomassa para o submodelo caule. Em estudo realizado por Feitosa (2021), visando à parametrização do modelo APSIM-Pasto Tropical, para a simulação de crescimento de *Megathyrsus maximus* cv. Mombaça, observaram-se poucas mudanças nos parâmetros de caule e órgãos, tomando como base Bosi et al. (2020), o que está em conformidade com os parâmetros ajustados para a Braquiária Ruziziensis, sugerindo sinergia para as pastagens tropicais entre os submódulos do APSIM-Pasto Tropical.

No submodelo radicular, foram modificados os valores dos parâmetros, fração estrutural da raiz de 0,8 para 1,0, para melhorar a eficiência do sistema radicular; nos parâmetros modificadores de absorção de NO₃ (KNO₃) e no modificador de absorção de NH₄ (KNH₄), houve mudanças na variável “x” de 0,08 para 0,003 (Tabela 8).

Tabela 8 Parâmetros do submodelo foliar, radicular e órgãos do APSIM-Pasto Tropical, parametrizados para o capim braquiária *Ruziziensis*, produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-PI, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Piatã	Ruziziensis
Submodelo de folha			
Coeficiente de extinção padrão	x: estágio	-	x: 0,0; 0,18; 2,0
	y: massa	-	y: 1,2; 0,67; 0,67
Coeficiente de extinção de luz (k)	adimensional	0,65	0,67
Função de altura	x: estágio	-	x: 0,0; 100; 1000
	y: massa	-	y: 100; 300; 1200
RUE da planta inteira	g MJ ⁻¹	1,44	1,56
Fator de temperatura (Ft)	x: temp. (°C)	x: 8,9; 30,2; 40,0; 45,0	x: 10,3; 30,2; 40,0; 45,0
	y: Ft valor	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0
Área foliar específica (Padrão)	x: idade (anos)	x: 0,0; 0,3; 0,7	x: 0,0; 0,07; 0,11; 0,14; 0,22; 0,26; 2,0
	y: SLA (m ² g ⁻¹)	y: 0,015; 0,018; 0,020	y: 0,009; 0,009; 0,026; 0,015; 0,016; 0,025
Submodelo de órgãos			
DM fator de IAF de órgãos	x :fotoperíodo	x:0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0	x:0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0
	y: fator	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0	y:2,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0
Submodelo de raiz			
Fração estrutural da raiz	0-1	0,8	1,0
Modificador de absorção de NO ₃ (KNO3)	x: densidade de raiz	x: 0,0; 0,08	x: 0,0; 0,003
	y: absorção de NO ₃	y: 0,03; 0,03	y: 0,03; 0,03
Modificador de absorção de NH ₄ (KNH4)	x: densidade de raiz	x: 0,0; 0,08	x: 0,0; 0,003
	y: absorção de NH ₄	y: 0,0; 0,0;	y: 0,0; 0,0;

As variações com dados observados e previstos em resposta à calibração dos parâmetros das variáveis de Bst, Bsc, Bsf e IAF, obtidos ao longo do ciclo de cultivo em condição irrigada e sistema de cultivo solteiro, encontram-se na Figura 9. As simulações de crescimento apresentaram boa performance ao longo das séries de dados previstos em escala diária, quando comparadas com os dados observados para as condições analisadas, demonstrando a robustez do modelo APSIM, na simulação do crescimento do capim braquiária *Ruziziensis* (Figura 9a, b, c e d).

A estimativa da biomassa viva apresentou valores crescentes ao longo do desenvolvimento da planta, apresentando a mesma tendência de incremento da biomassa viva observada, sustentada pela forte correlação e eficiência do modelo com R^2 de 0,99 NSE=0,99, entre dados simulados e observados (Figura 9a). Essa mesma tendência foi observada por Souza et al. (2022), sob regime irrigado e sistema de cultivo solteiro com pastagem tropical, ainda que utilizando genótipo diferente do utilizado na presente pesquisa. Os incrementos de biomassa viva simulada de colmo e folha (Figuras 9b e c) foram coerentes com o acúmulo de biomassa observada, bem como os valores do IAF simulados e observados, demonstrando que o modelo é capaz de capturar os efeitos do manejo e das condições ambientais impostas ao capim braquiária *Ruziziensis*, sob regime irrigado e cultivo solteiro (Figura 9a, b, c e d).

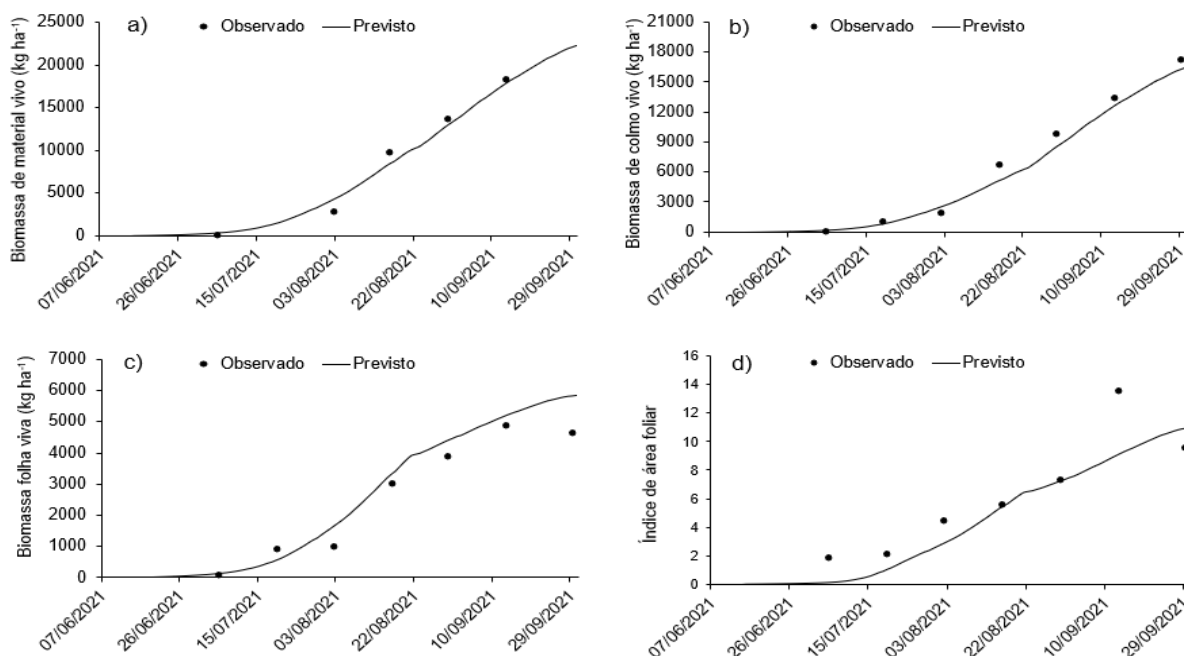


Figura 9 Variação de massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária *Ruziziensis*, sob cultivo em sistema solteiro e regime irrigado, realizado no período de junho a setembro de 2021, em Teresina-Piauí, Brasil

Os resultados das análises para comparação dos valores observados e previstos de biomassa seca total acima do solo (Bst, kg ha⁻¹), biomassa seca de folha viva (Bsf, kg ha⁻¹), biomassa seca de colmo vivo (Bsc, kg ha⁻¹), Índice de área foliar (IAF) do capim braquiária *Ruziziensis* solteiro estão descritos na (Figura 10).

O modelo APSIM foi capaz de simular o crescimento da planta e suas partições, fornecendo simulações de qualidade satisfatória a muito boa. A simulação da Bst apresentou boa precisão ($R^2=0,99$), boa acurácia (NSE=0,99), o que está em conformidade com os estudos de Bosi et al. (2022), com concordância variando de boa, a muito boa, R^2 entre 0,75 a 0,86 e NSE insatisfatório a muito bom, variando entre 0,32 e 0,85, para biomassa viva em testes com o APSIM para braquiária Piatã (Figura 8a). Ainda com relação à simulação de Bst, o APSIM forneceu métricas satisfatórias para todos os parâmetros avaliados, com valores (ME=175,4 kg ha⁻¹, MAE=654,7 kg ha⁻¹, RMSE=801,4 kg ha⁻¹) e um excelente (NRMSE=8,17%), seguindo a mesma tendência observada por Souza et al. (2022), na calibração do APSIM com capim braquiária Marandu em sistema irrigado, na simulação de biomassa viva com RMSE de 929,7 kg ha⁻¹, bem como por Gomes et al. (2020), com a mesma cultivar em sistema de sequeiro, também na fase de calibração do APSIM, que obtiveram a simulação da biomassa estimada de forma satisfatória, com R^2 variando entre 0,82 e 0,89 e NSE variando entre 0,66 e 0,84, evidenciando a eficácia do modelo APSIM para simular o crescimento de pastagens tropicais para as condições impostas ao sistema.

As partições de matéria seca entre os órgãos vivos acima do solo (colmo e folha) foram simuladas de forma satisfatória, apresentando boa precisão e exatidão entre os dados observados e previstos, com $R^2=0,99$ e NSE=0,97, para colmo, e $R^2=0,97$ e NSE=0,92, para folha (Figuras 10b e 10c). As simulações para o índice de área foliar também apresentaram boa precisão ($R^2= 0,81$) e boa acurácia (NSE=0,72).

Os resultados para as variáveis em questão encontram-se de acordo com as evidências apresentadas por Bosi et al. (2020), simulados com muito boa precisão, com R^2 variando entre 0,89 e 0,94, e muito boa exatidão, com NSE de 0,88 a 0,92. Por outro lado, as estimativas do IAF forneceram simulações de insatisfatórias a boas, com R^2 variando entre 0,56 e 0,78 e NSE = -2,08 e 0,55.

As métricas obtidas para Bsc foram razoáveis, fornecendo valores com ME=575,4 kg ha⁻¹, MAE=818,2 kg ha⁻¹ e RMSE=959,2 kg ha⁻¹. Os resultados deste estudo foram um pouco divergentes com o que observou Bosi et al. (2020), em estudo

com o capim Piatã sob irrigação para mesma variável com valores de $ME=-227,0 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=345,9 \text{ kg ha}^{-1}$ e $RMSE=393,3 \text{ kg ha}^{-1}$. Por outro lado, os valores das métricas obtidos para variável folha, obtidos pelos mesmos autores com valores de $ME=314,0 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=374,6 \text{ kg ha}^{-1}$, $RMSE=468,0 \text{ kg ha}^{-1}$, apresentaram forte similaridade com os valores obtidos na presente pesquisa cujos valores foram: $ME=-399,6 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=499,0 \text{ kg ha}^{-1}$ e $RMSE=604,8 \text{ kg ha}^{-1}$. Os valores das métricas do IAF apresentaram valores de $ME=1,40$, $MAE=1,47$ e $RMSE=2,0$, com forte similaridade entre os valores obtidos por Bosi et al. (2020), com $ME=1,7$, $MAE=1,7$ e $RMSE=1,9$.

Os valores do NRMSE variaram de ruim a bom, conforme classificação de Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), com valores de $NRMSE=13,36\%$ para Bsc, $NRMSE=23,02\%$ para Bsf e $NRMSE=31,54\%$ para IAF. Os resultados obtidos na presente pesquisa sustentam a capacidade de o modelo APSIM simular o crescimento e rendimento de biomassa ao longo do seu desenvolvimento fenológico, levando em conta as condições edafoclimáticas e de manejo impostas ao capim braquiária Ruziziensis, sob irrigação e sistema de cultivo solteiro.

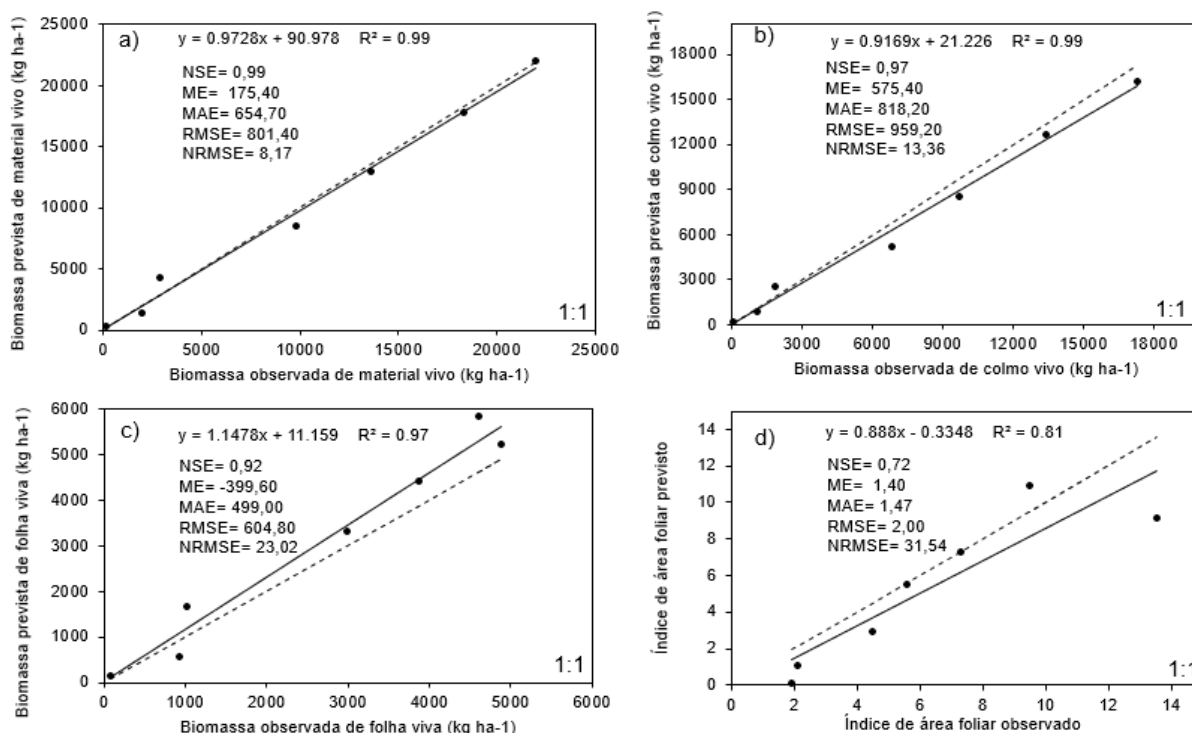


Figura 10 Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária *Ruziziensis* sob cultivo em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.1.2 Braquiária *Ruziziensis* em consórcio

Os dados observados e previstos de radiação e água disponível no solo (0 a 1,2 m) em escala diária, respectivamente, são apresentados nas Figuras 11a e 11b. Os valores máximos e mínimos diários de radiação solar observados entre a germinação e a colheita ficaram em torno de 11,35 e 0,56 MJ m⁻², respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos, previstos pelo modelo APSIM, ficaram entre 4,40 e 1,62 MJ m⁻², respectivamente (Figura 11a). O modelo não conseguiu capturar de forma satisfatória a simulação da radiação no início da série de dados, contrastando com a subestimação em relação aos dados observados. Em tese, a braquiária, no início do desenvolvimento fenológico, não foi afetada pela competição por radiação com o milho em consórcio.

A altura do dossel das gramíneas forrageiras, em geral, possui relação direta com a interceptação luminosa (Silva, 2004), justificando a maior interceptação de radiação pela braquiária no início do ciclo pelo pouco desenvolvimento do milho nesse

dado momento. No entanto, a partir do 4º ciclo de coletas de dados, o modelo conseguiu capturar de forma ajustada os dados previstos em comparação com as observações, coincidindo com o sombreamento do milho na braquiária em consórcio, dado o seu maior desenvolvimento em relação ao capim (Figura 11a). Os valores máximos e mínimos diários de água disponível no solo, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 165,69 e 154,56 mm, equivalentes a 1,38 e 1,28 mm cm⁻¹, respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos de água disponível no solo, previstos pelo modelo APSIM, ficaram em torno de 165,58 e 140,27 mm, equivalentes a 1,37 e 1,16 mm cm⁻¹, respectivamente (Figura 11b).

O modelo simulou de forma satisfatória a dinâmica da água no solo, capturando a simulação com o mesmo padrão de dados observados; porém, com o valor mínimo previsto (140,27 mm) contrastando brevemente com o mínimo (154,56 mm) observado no início da simulação, o que, logo em seguida, o modelo ajustou aos dados observados (Figura 11b).

O módulo de solo no APSIM trabalha o balanço de água com entrada e saída de água, camada a camada, considerando o solo inicialmente com água no limite inferior; no entanto, os dados observados demonstram o solo sempre com reposição de água ao limite superior, devido à condição de irrigado adotada no sistema de cultivo. Os resultados de Souza et al. (2022) apresentaram pouca precisão na simulação de dados de água no solo em sistema irrigado. Isso talvez se explique em função da baixa amplitude de água no solo em sistemas irrigados, ao longo da camada de solo (Figura 11b).

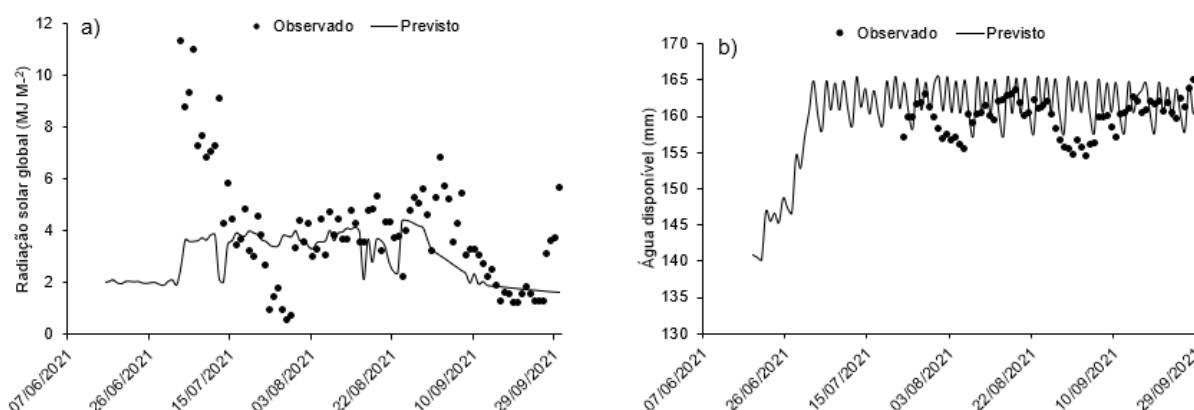


Figura 11 Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m) observada e prevista, utilizada na parametrização do capim braquiária *Ruziziensis* cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021. Teresina-Piauí, Brasil

Os valores de fotoperíodo crítico para mudanças de fases da cultura, ajustados conforme as diferentes partições de biomassa (folha, caule, raiz e órgãos), para braquiária consorciada com milho, apresentaram similaridade com os parâmetros da braquiária cultivada em sistema solteiro (Tabela 8).

A braquiária *Ruziziensis* produzida em sistema consorciado apresentou o mesmo padrão fenológico da planta em cultivo solteiro. As partições para as mudanças de fases foram similares por influência do fotoperíodo para todas as fases de desenvolvimento da planta (Tabela 8). As plantas de capim braquiária em sistema consorciado sofreram igual interferência do tempo termal e do fotoperíodo com relação à proporcionalidade das partições dos fotoassimilados do capim braquiária solteiro, quando comparadas as fases e mudanças de fases fenológicas (Tabela 8).

A calibração do APSIM para o capim braquiária *Ruziziensis* em sistema de cultivo consorciado apresentou acréscimo de alguns parâmetros relevantes, em comparação à calibração do cultivo em sistema solteiro, possibilitando a obtenção de uma série de parâmetros ajustados (Tabela 9). No submodelo folha, foram acrescentados os parâmetros fator de sombreamento da folha, variando de (0 a 1), coeficiente de extinção de material morto (valor=0,57) e um coeficiente de extinção de luz padrão (k), que se estabilizou com 2 (anos), para melhor acompanhar as simulações das observações. Esses parâmetros que foram acrescentados representaram a competição por luz do milho com a braquiária no sistema consorciado.

Os demais valores de parâmetros, coeficiente de extinção K (0,67), eficiência do uso da radiação RUE ($1,56 \text{ g MJ}^{-1}$), fator de temperatura F_t , fator de nitrogênio F_n , área foliar específica padrão SLA ($0,025 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) e os seus fatores hídricos F_w e idade (Tabela 9), apresentaram similaridade com os parâmetros da calibração da braquiária solteira (Tabela 8). Os parâmetros calibrados para o crescimento de caule e órgãos do capim braquiária em cultivo consorciado apresentaram concordância com os valores calibrados para o capim braquiária em cultivo solteiro e similaridade com todos os parâmetros calibrados para o capim Piatã (Bosi et al., 2020). No submodelo radicular, os valores dos parâmetros, fração estrutural da raiz mudou sua variação de (0,8 para 1,0); no modificador de absorção, de NO_3 (KNO_3), e, no modificador de absorção de NH_4 (KNH_4), houve mudança na variável “ x ”, variando de (0,08 para 0,003), com iguais valores (Tabela 9). Os demais valores foram similares aos calibrados para o capim Piatã, conforme Bosi, et al. (2020).

Tabela 9 Parâmetros do submodelo foliar e radicular parametrizados para o capim braquiária *Ruziziensis*, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Piatã	Ruziziensis
Submodelo foliar			
Coeficiente de extinção de luz (k)	-	0,65	0,67
Coeficiente de extinção de luz padrão (k)	x: idade (anos)	-	x: 0; 0,18; 2
	y: valor do fator	-	y: 1,2; 0,67; 0,67
Fator de sombreamento da folha	x: fração de rad. transm.	-	x: 0; 0,6; 0,8; 0,9; 1
	y: valor do fator	-	y: 7; 6; 5; 4; 1
Coeficiente de extinção de material morto	-	-	0,57
Eficiência do uso da radiação (RUE)	g MJ ⁻¹	1,44	1,56
Fator de temperatura (Ft)	x: temperatura (°C)	x: 8,9; 30,2; 40,0; 45,0	x: 10,3; 30,2; 40,0; 45,0
	y: Ft valor	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0
Fator de nitrogênio (Fn)	x: concentração de N	x: 0,005; 0,021	x: 0,0; 1,0
	(g g ⁻¹)	y: 0,0; 1,0	y: 0,0; 1,0
Função de morte de folha pelo frio	x: temp. mínima. (°C)	x: 0,0; 2,0	x: 0,0; 2,0
	y: valor do fator	y: 0,0; 1,0	y: 0,14; 0,0
Área foliar específica (Padrão)-SLA	x: idade (anos)	x: 0,0; 0,3; 0,7	x: 0,0; 0,07; 0,11; 0,14; 0,22; 0,26
	y: SLA (m ² g ⁻¹)	y: 0,015; 0,018; 0,020	y: 0,009; 0,009; 0,026; 0,015; 0,016; 0,025
Submodelo de raiz			
Fração estrutural da raiz	0-1	0,80	1,0
Modificador de absorção de NO ₃ (KNO ₃)	x: dens. do comp. da raiz	x: 0,0; 0,08	x: 0,0; 0,003
	y: absorção de NO ₃	y: 0,03; 0,03	y: 0,03; 0,03
Modificador de absorção de NH ₄ (KNH ₄)	x: dens. do comp. da raiz	x: 0,0; 0,08	x: 0,0; 0,003
	y: absorção de NH ₄	y: 0,0; 0,0;	y: 0,0; 0,0;

As séries temporais com dados observados e previstos em resposta à calibração dos parâmetros das variáveis de Bst, Bsc, Bsf e IAF, obtidos ao longo do ciclo de cultivo em condição irrigada e sistema de cultivo consorciado, encontram-se na Figura 12a, b, c, d.

O modelo conseguiu capturar os efeitos do manejo e das condições ambientais impostas ao capim braquiária *Ruziziensis*, em sistema consorciado. As simulações de crescimento apresentaram boa performance ao longo das séries de dados previstos em escala diária, quando comparadas com os dados observados para as condições analisadas, demonstrando a robustez do modelo APSIM, na simulação do crescimento do capim braquiária *Ruziziensis* (Figura 12a, b, c, d).

Quando se compara o crescimento do capim braquiária em sistema solteiro com o capim braquiária em sistema consorciado (Figura 12a, b, c e d), percebe-se leve queda na eficiência da simulação, NSE variando entre 0,62 e 0,63 (Figura 12a, b, c, d), em contraste com a eficiência da simulação do crescimento do capim braquiária em sistema solteiro, NSE variando entre 0,72 e 0,99 (Figura 10a, b, c, d). Esse fato pode estar associado a uma leve incapacidade do modelo em capturar a competição interespecífica dentro do sistema de cultivo, tendo em vista que as plantas, em geral, quando submetidas ao processo de competição, tendem a se adequarem à situação adversa imposta pelo sistema. As observações de Paciullo et al. (2008) e Martuscello et al. (2009) evidenciaram que o sombreamento induz à elevação das taxas de alongamento de folhas e colmos, com incremento de altura de plantas (Pezzopane et al., 2019), sugerindo gasto de energia na fotorrespiração em detrimento da fotossíntese para produção de biomassa (Carrilho et al., 2012).

Em conformidade com os relatos da literatura, os resultados da presente pesquisa evidenciaram queda de rendimento da braquiária consorciada com milho, quando comparada com a braquiária em cultivo solteiro, reforçando a ideia de competição dentro de sistemas consorciados por fatores de produção (Figuras 12a e 10a).

Tendo em vista a ausência de pesquisas com a simulação de observações em sistemas consorciados de milho com braquiária *Ruziziensis* nas condições edafoclimáticas e manejo imposto às culturas, essas observações apontam a necessidade da realização de mais pesquisas neste sentido para melhor compreensão da dinâmica e plasticidade de desenvolvimento das culturas para

diminuir as incertezas das simulações e atestar a capacidade de o modelo simular cultivos em sistemas consorciados nessas condições.

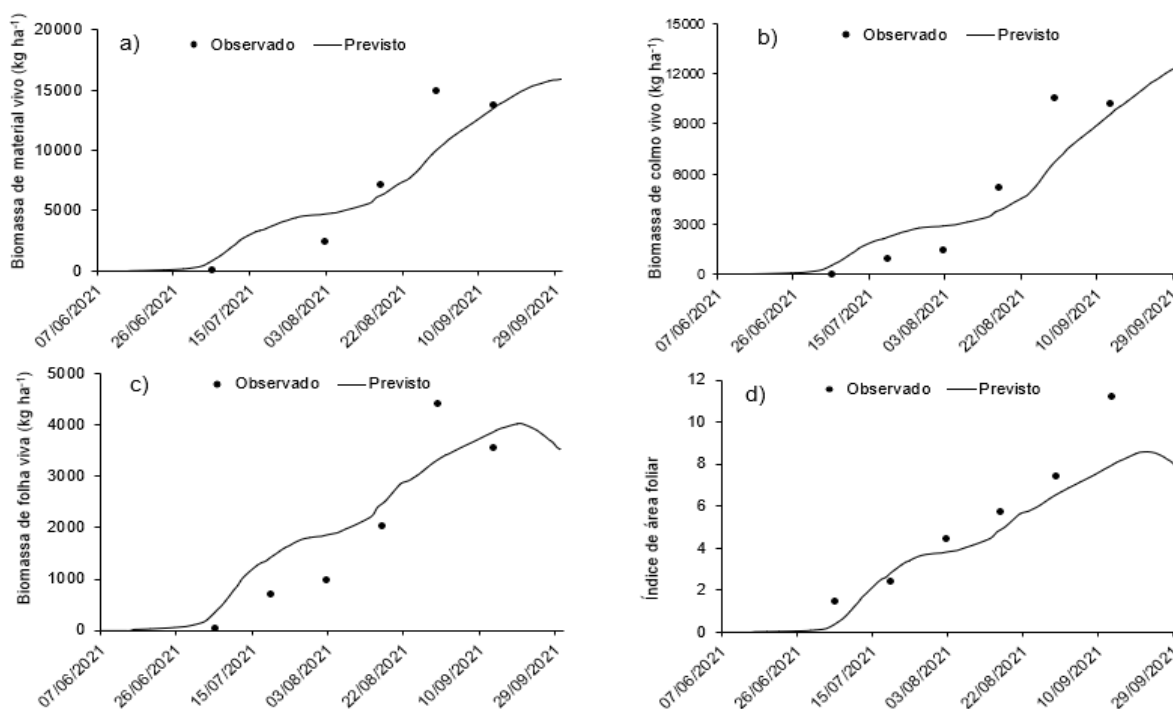


Figura 12 Variação da massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Ruziziensis, sob cultivo em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

A parametrização do modelo APSIM-Pasto Tropical para braquiária Ruziziensis consorciada com milho teve como base inicial os parâmetros calibrados para o capim braquiária Ruziziensis cultivado em sistema solteiro.

Os resultados das análises dos dados obtidos para o capim Braquiária, cultivado em sistema consorciado, para comparação dos valores estimados e previstos de Biomassa seca total de material vivo acima do solo (Bst , kg ha^{-1}), Biomassa seca de folha viva (Bsf , kg ha^{-1}), Biomassa seca de colmo vivo (Bsc , kg ha^{-1}), Índice de área foliar IAF, estão descritos nas (Figuras 13a, b, c e d).

As simulações para o capim Braquiária cultivado em sistema consorciado apresentaram resultados para Bst com boa precisão ($R^2=0,88$) e satisfatória eficiência ($NSE=0,67$). O modelo apresentou métricas satisfatórias para (Bst), com ($ME=228,30 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=1860,50 \text{ kg ha}^{-1}$, $RMSE=2418,90 \text{ kg ha}^{-1}$). Os valores das simulações obtidas para as partições de Bsc e Bsf foram consideradas com boa precisão ($R^2=0,88$ e $0,87$) e satisfatória eficiência ($NSE=0,62$ e $0,66$) para colmo e folha, respectivamente. De acordo com as evidências apresentadas por Gomes et al., (2020), com resultados

para biomassa viva, simulados com muito boa precisão $R^2=0,83$ e boa exatidão com $NSE=0,75$, é possível demonstrar que o modelo simulou de forma satisfatória a biomassa viva de forragem e as partições com relação às observações desta pesquisa, quando se consideram as métricas para Bsc com ($ME=485,60 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=1494,80 \text{ kg ha}^{-1}$, $RMSE=1874,70 \text{ kg ha}^{-1}$), para Bsf, com ($ME=-257,20 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=618,80 \text{ kg ha}^{-1}$, $RMSE=687,00 \text{ kg ha}^{-1}$), sustentadas pela forte correlação entre as simulações e observações.

As simulações para o índice de área foliar também apresentaram boa precisão ($R^2=0,93$) e boa acurácia ($NSE=0,62$), para IAF com ($ME=1,07$, $MAE=1,19$, $RMSE=1,52$), indicando que as condições de ambiente e manejo não afetaram a capacidade do modelo na simulação dessa variável do capim Braquiária em sistema consorciado com o milho. Os valores de NRMSE, em conformidade com o melhor ajuste de dados, foram considerados razoáveis para todas as variáveis avaliadas, variando entre 24,96 e 27,17%), conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012). Os valores das métricas fornecidos pelo modelo estão dentro de limiares razoáveis, sustentados pela forte correlação e boa eficiência observada no modelo. Nessa mesma linha, Souza et al. (2021) relataram que o modelo APSIM simulou com precisão todas as variáveis testadas (biomassa viva, massa foliar, IAF e altura), com valores entre 0,64 a 0,86 para coeficiente de determinação R^2 e NSE variando entre 0,59 a 0,70, em cultivo com capim Braquiária. Em conformidade com a mesma discussão, Bosi et al. (2020) relataram que o APSIM simulou a massa viva da forragem com muito boa precisão, com R^2 variando entre 0,89 e 0,94 e muito boa exatidão, com NSE de 0,88 a 0,92 e um $RMSE$ de $620,3 \text{ kg ha}^{-1}$. Esses relatos, em comparação favorável com as simulações satisfatórias para as variáveis em questão reforçam as evidências de que o APSIM apresenta capacidade de simular sistemas consorciados com graminíferas e pastagens tropicais em diversos ambientes.

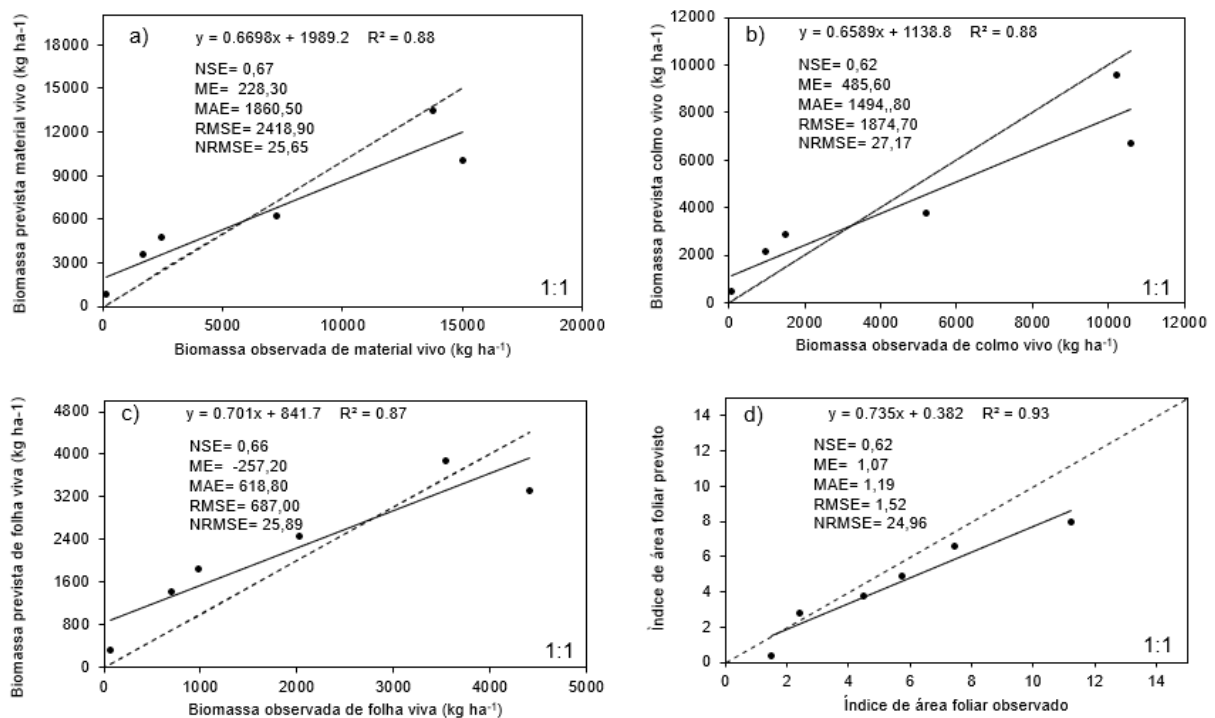


Figura 13 Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Ruziziensis sob cultivo em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.1.3 Milho solteiro

Os dados de radiação e água disponível no solo, observados e previstos no presente estudo, apresentam-se, respectivamente, nas (Figuras 14a e 14b). Os valores máximos e mínimos diários de radiação solar observados entre a germinação e a colheita ficaram em torno de (16,16 e 3,39 MJ m⁻²), respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos, previstos pelo modelo APSIM, ficaram entre (16,45 e 0,42 MJ m⁻²), respectivamente (Figura 14a).

Os valores observados de radiação em comparação com as previsões apresentaram divergência no final do ciclo de cultivo em razão do modelo antecipar o ciclo do ciclo da cultura e os sensores as observações continuarem em outro viés em função das folhas mortas ainda continuarem interceptando radiação.

Os valores máximos e mínimos diários de água disponível no solo, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 159,81 e 128,54mm que correspondem em média a 0,13 e 0,11 mm mm⁻¹, respectivamente, enquanto os

valores máximos e mínimos de água disponível no solo, previstos pelo modelo APSIM, ficaram em torno de 150,41 e 138,09mm que corresponde em média a 0,13 e 0,12 mm mm⁻¹, respectivamente (Figura 14b). Os relatos de Souza et al. (2022) sustentam a hipótese para a inconsistência no ajuste de dados nas simulações de água no solo em sistemas irrigados em função da baixa amplitude entre os valores máximos e mínimos (Figura 14b).

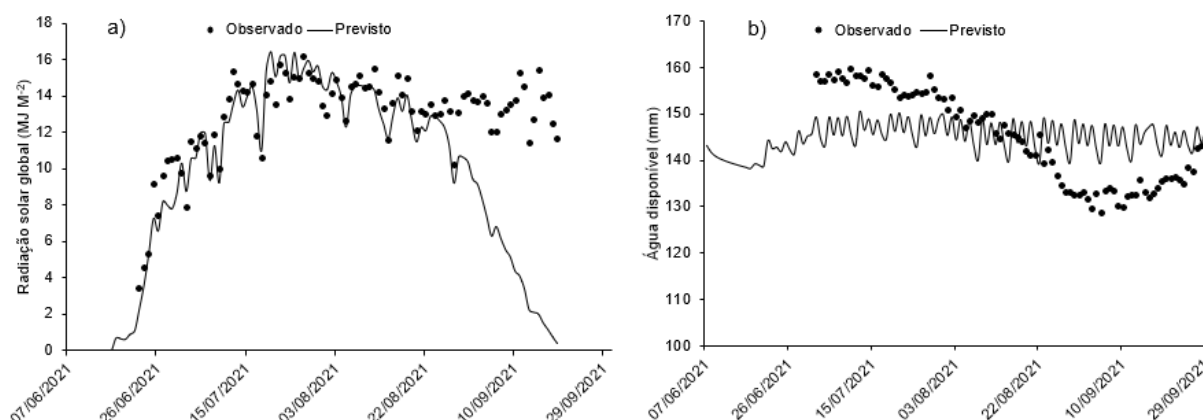


Figura 14 Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observadas e previstas, utilizadas na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

Na parametrização do modelo de milho, utilizou-se como base o APSIM-Milho, com seus parâmetros originais, procedendo com ajustes para obtenção da melhor simulação entre dados previstos e observados em campo. Os parâmetros fenológicos e os respectivos graus dias (GDA) estão descritos na Tabela 10.

As fases Juvenil e enchimentos de grãos demandaram maior tempo térmico (GDA), com relação a todas as fases, durante o desenvolvimento fenológico da planta até completar o ciclo reprodutivo (Tabela 10).

Tabela 10 Parâmetros fenológicos utilizados na calibração do milho solteiro, cultivado em sistema solteiro sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado em Teresina-Piauí, Brasil, 2021

Parâmetros	Valor	Descrição
1. Juvenil	140	GDA entre a emergência e o fim do estágio juvenil.
2. Folha bandeira-Floração	10	GDA entre a emissão da folha bandeira e floração.
3. Floração-Enchimento de grãos	10	GDA do florescimento ao enchimento de grãos.
4. Enchimento de grãos	550	GDA do início ao fim de enchimento de grãos.
5. Maturação de grãos	10	GDA do fim do enchimento a maturação fisiológica de grãos.
6. Maturação-Colheita	10	GDA maturação para colheita.
1 – GDA entre a emergência e a 4ª folha totalmente expandida (V4); 2 – GDA entre o florescimento (R1) à maturação fisiológica (R6); 3 – GDA entre dois dias após o pendoamento (VT) e o florescimento (R1); 4 – GDA entre o florescimento (R1) e o início enchimento de grãos (R2); 5 – GDA entre a maturação fisiológica (R6) e a colheita. GDA*=grau dia acumulado.		

Na parametrização do modelo de milho solteiro, foram realizadas mudanças importantes nas variáveis do submodelo foliar. A área foliar específica máxima variou de 20000 para 15000 mm² g⁻¹ e a área foliar específica mínima variou entre 20000 e 15000 mm² g⁻¹; a duração do crescimento da folha variou de 50 GD para 300 GD; a duração do atraso na emissão da folha variou de 1300 para 750 GD. Além destas mudanças, foi acrescentado ao submodelo foliar, o parâmetro fator fenológico da folha com valor padrão do fator (y=1), conforme Tabela 11.

No submodelo de caule, houve mudanças importantes na variável e no respectivo fator do parâmetro taxa de senescência do caule no fator “y”, com valor (padrão=1), e no parâmetro fração de partição do caule houve mudança no intervalo de valores do fator “y” com valor padrão (0 g m⁻²), conforme Tabela 11.

Os parâmetros principais que mediam o crescimento radicular para calibração do modelo e obtenção dos melhores ajustes foram as funções de demanda de nutrientes (DM), com mudanças no intervalo de valores do fator “y”, valor padrão (0 g m⁻¹) no sétimo estágio, conforme Tabela 11. Ainda com relação ao submodelo radicular, houve o acréscimo dos parâmetros, fator de aeração e fator de estresse de profundidade da raiz, valor padrão do (fator=1), para ambos os parâmetros, respectivamente, para o modelo melhor compreender as condições hídricas e físicas do solo com relação ao desenvolvimento radicular (Tabela 11).

Tabela 11 Parâmetros do submodelo foliar, caule e raiz, parametrizado para o milho cultivado em sistema de cultivo solteiro sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido BM 709 PRO
Submodelo foliar			
Duração do crescimento da folha	x: nó aparente	x: 0; 0,3; 0,5; 1	x: 0; 0,3; 0,5; 1
	y: (graus dia; GD)	y: 0,5; 100; 125; 50	y: 2,0; 500; 600; 300
Duração do atraso da folha	x: nº. de nós	x: 0; 0,5; 0,7; 0,8; 1	x: 0; 0,5; 0,7; 0,8; 1
	y: (graus dia; GD)	y: 300; 300; 700; 900; 1300	y: 250; 250; 450; 550; 750
Duração da Senescência da folha	x: nó aparente	x: 0; 0,3; 0,5	x: 0; 0,3; 0,5
	y: (graus dia; GD)	y: 500; 500; 700	y: 150; 150; 350
Área foliar específica máxima	x: folhas aparentes	x: 1; 9	x: 1; 6; 13; 20
	y: SLA (mm ² g ⁻¹)	y: 30000; 20000	y: 10000; 30000; 15000; 15000
Área foliar específica mínima	x: folhas aparentes	x: 1,0; 9,0	x: 1,0; 9,0
	y: SLA (mm ² g ⁻¹)	y: 25000; 15000	y: 20000; 15000
Coeficiente de extinção de luz (k)	Adimensional	3,0	3,0
Fator fenológico da folha	x: estágio	-	x: 0,0; 1; 2; 3; 4; 5; 5,109; 8; 5,11; 5,2; 5,3; 6; 7; 8; 9; 10
	y: fator	-	y: 100; 100; 100; 100; 100; 50; 20; 10; 5; 1,5; 1; 1; 1; 1; 1
Submodelo caule			
Taxa de senescência do caule	x: estágio	x: 0	x: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 10,999; 11
	y: fração (0-1) dia ⁻¹	y: 0	y: 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 1
Fração de partição de caule	x: estágio	x: 3; 5; 6; 7; 7,001	x: 3; 5; 6; 7; 7,001
	y: g m ⁻²	y: 0,1; 1; 0,4; 0; 0	y: 0,5; 0,5; 1; 1; 0
Submodelo radicular			
Fator de aeração	x: espaço de poro (0-1)	-	x: 0,0; 0,03; 1
	y: fator (mm dia ⁻¹)	-	y: 1,0; 1,0; 1,0
Fator de estresse de profundidade	0-1	-	1,0
Funções de DM de nutrientes	x: (estágio)	x: 0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0	x: 0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0
	y: g m ⁻¹)	y: 0,0; 0,0; 0,1; 0,1; 0,0	y: 0,0; 0,0; 0,2; 0,2; 0,0

Nos parâmetros do submodelo grãos, não houve variação de valores nas variáveis com seus respectivos fatores, com relação à base dos parâmetros do modelo de milho “APSIM-Milho” por ocasião da calibração. Nos parâmetros do submodelo palha, houve mudanças na variável estágio inicial da palha, variando de 5,70 para 5,22; duração do crescimento variando de 330 para 500 GD; e peso máximo de palha que variou de 30 para 35 g, respectivamente, contribuindo com os melhores ajustes dos valores previstos em relação aos valores observados do submodelo palha (Tabela 12).

No submodelo ráquis, houve mudanças nos parâmetros estágio inicial da ráquis, variando de 5,80 para 5,23; duração do crescimento, variando de 900 para 300 GD; e peso máximo de ráquis que variou de 23 para 37 g, respectivamente, fornecendo os melhores ajustes do submodelo ráquis, conforme Tabela 12.

Tabela 12 Parâmetros do submodelo palha e ráquis, parametrizado para o milho produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido BM 709 PRO
Submodelo palha			
Estágio Inicial	Fase	5,70	5,22
Duração do crescimento	tempo (GDA)	330,0	500,0
Peso máximo	g	30,0	35,0
Submodelo ráquis			
Estágio inicial	Fase	5,80	5,23
Duração do crescimento	(GDA)	900,0	300,0
Peso máximo	g	23,0	37,0

O modelo capturou a simulação do crescimento acumulado da cultura em escala diária de forma satisfatória da Bst, Bsc, Bsf, (Figuras 15a, b, c). Ainda que o modelo tenha simulado o desenvolvimento do (IAF) seguindo o mesmo padrão dos dados observados, houve subestimação dos dados previstos, demonstrando leve inconsistência no ajuste de dados (Figura 15d). Chisanga et al. (2021), em trabalho utilizando o modelo APSIM-Milho, simularam com imprecisão o IAF, para três cultivares de milho avaliadas. O IAF é um importante indicador de crescimento da planta de milho (Hoogenboom, et al., 1999). Dessa forma, as medições de campo ou laboratório dessa variável são necessárias para avaliar adequadamente o modelo de

cultivo. A determinação do IAF passa por uma série de etapas para sua obtenção, o que pode aumentar a variabilidade de erros, exigindo rigor, para evitar erros sistemáticos que eventualmente possam prejudicar as previsões pelo modelo.

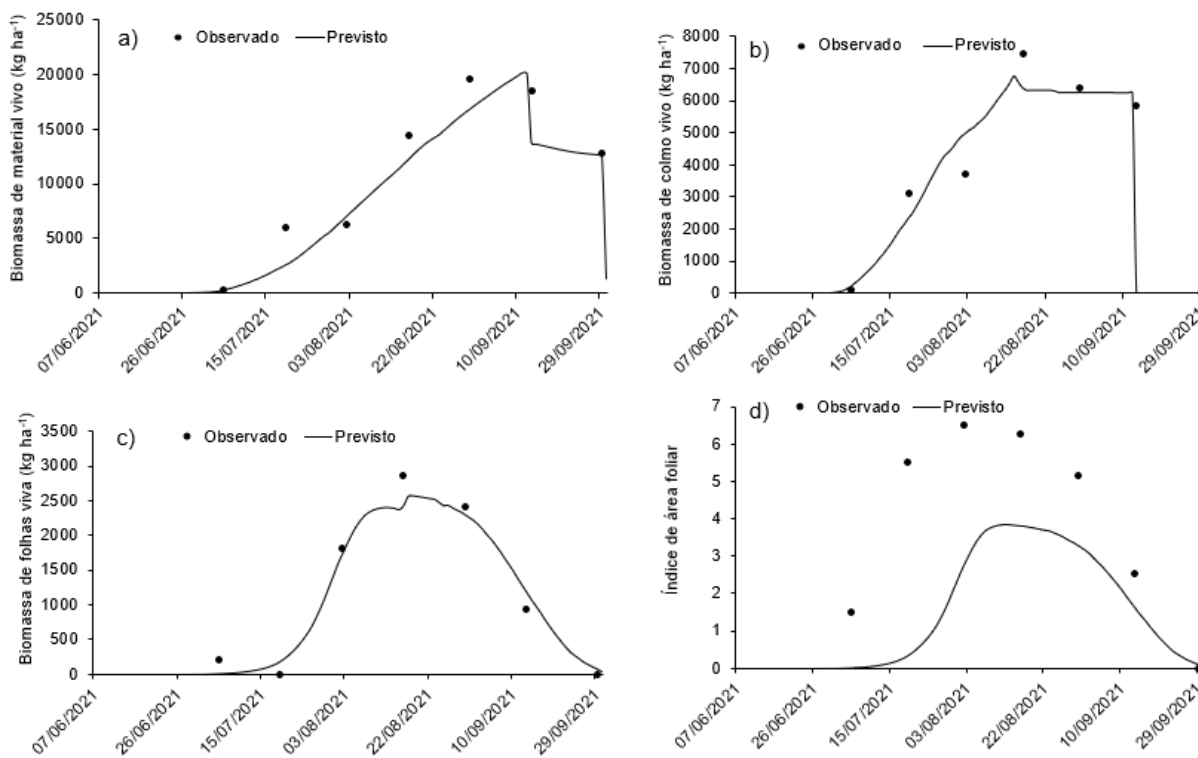


Figura 15 Variação de massa viva e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

O modelo capturou os efeitos de manejo e das condições ambientais impostas ao milho em sistema solteiro, sob irrigação, simulando os componentes de rendimento das partições (palha, ráquis e grãos), de forma satisfatória (Figuras 16e, f, g). Ainda que o modelo tenha capturado a simulação do desenvolvimento da variável palha com subestimação no início do desenvolvimento, observa-se boa performance na captura do desenvolvimento de grãos e ráquis.

O rendimento acumulado observado para o milho solteiro sob irrigação ficou em torno de 9.906,2 kg ha⁻¹ e os valores simulados foram de 9.475,2 kg ha⁻¹, com uma leve subestimação ao longo do desenvolvimento da cultura (Figura 16g). Carvalho et al. (2020) relataram, em suas observações com o cultivo do milho solteiro sob irrigação, valores de rendimento em torno de 7.200 kg ha⁻¹, coerentes com as observações desta pesquisa. Baum et al. (2023), utilizando o APSIM, relataram simulações satisfatórias com R² variando entre 0,80 a 0,97, com valores observados

variando entre 546 a 17.147 kg ha⁻¹, levando em conta diferentes locais e doses de nitrogênio (N). Chisanga, et al. (2021) relataram, em suas observações, que o modelo APSIM simulou de forma aceitável o peso de grãos. Contudo, diversas pesquisas sugerem que o APSIM ainda precisa passar por aperfeiçoamentos nos seus diferentes submodelos para melhor ajustar suas previsões, ainda que a maioria das simulações sejam obtidas de forma satisfatória (Bosi et al., 2020; Morel et al., 2020; Holzworth et al., 2020; Berghuijs et al., 2021).

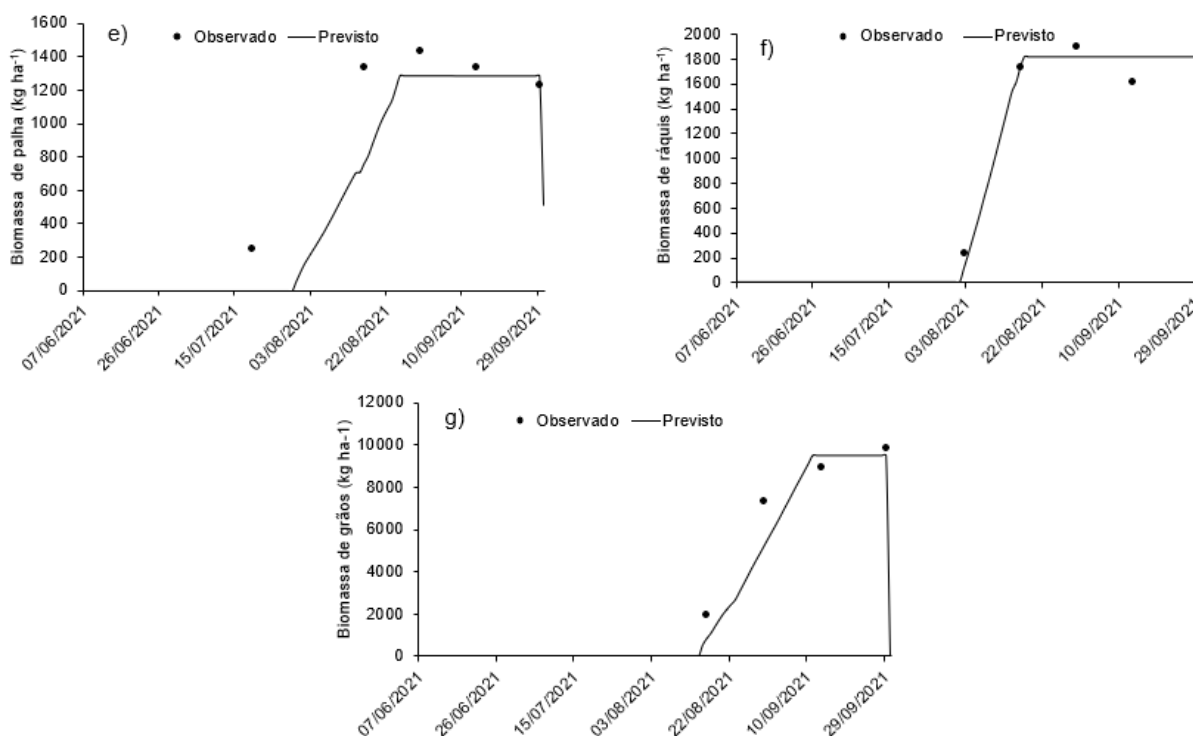


Figura 16 Variação de massa de palha, ráquis e grãos, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

O ajuste de parâmetros, descritos na Tabelas 11 e 12, forneceram os melhores resultados das simulações da Biomassa seca total de material vivo acima do solo (Bst, kg ha⁻¹), Biomassa seca de folha viva (Bsf, kg ha⁻¹), Biomassa seca de colmo vivo (Bsc, kg ha⁻¹), Índice de área foliar (IAF), apresentados nas Figuras (17a, b, c, d), além da Biomassa seca de grãos (Bsg, kg ha⁻¹), Biomassa seca de palha (Bsg, kg ha⁻¹), Biomassa seca de ráquis (Bsr, kg ha⁻¹), apresentados nas Figuras (18e, f, g), na calibração do APSIM para o milho em cultivo solteiro.

As simulações de dados previstos das partições de Bst, Bsf foram simuladas com boa precisão ($R^2=0,93$ e $0,97$) e boa acurácia, com (NSE=0,79 e $0,95$), respectivamente, sustentando as métricas fornecidas pelo APSIM, para Bst com

valores de ($ME=1813,30 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=2028,10 \text{ kg ha}^{-1}$, $RMSE=2609,60 \text{ kg ha}^{-1}$) e para Bsf (Bsf com ($ME=82,10 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=188,30 \text{ kg ha}^{-1}$) (Figura 17a e 17c). Os valores das referidas variáveis mostram-se dentro de limiares aceitáveis, apoiados pela forte correlação e alta eficiência, quando comparados os dados simulados e observados, sugerindo, principalmente, que o APSIM é capaz de simular a biomassa total da cultura com bom desempenho. No entanto, as simulações foram insatisfatórias para Bsc e o IAF (R^2 de 0,49 e 0,43) com (NSE de 0,28 e -3,33), respectivamente, (Figura 17b, d) (Moriasi et al., 2007). No caso do IAF, (Figura 17d), o resultado negativo do NSE sugere que a média dos valores observados é um melhor preditor do que o modelo, conforme (Gaydon, et al., 2017).

Em geral, as pesquisas mostram que os valores simulados para o IAF apresentam superestimação ou subestimação em alguma fase de desenvolvimento da cultura para simulações, em comparação aos dados observados. Contudo, a simulação insatisfatória da variável IAF, obtida nesta pesquisa, sugere maior rigor nas observações para essa determinação, considerando a realidade de outras pesquisas semelhantes (Santos, 2015; Morel, et al. 2020; Chisanga et al. 2021), com relatos de imprecisão na determinação da mesma variável. Santos (2015) considerou razoável as simulações realizadas para o IAF com a cultura do milho em diferentes locais e épocas de semeadura, com $RMSE=1,59 \text{ cm}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ dentre as avaliações, com relatos de subestimação em algumas situações. Morel et al. (2020) sugeriram a realização de pesquisas visando mais medições com foco na determinação do IAF para melhor compreensão de inconsistências apresentadas nas simulações dessa variável pelo APSIM em suas pesquisas.

Os valores fornecidos pelo modelo para o NRMSE variaram entre 16,2 a 65,07%, para todas as variáveis analisadas com todas as previsões consideradas entre razoável e ruim, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), (Figura 17a, b, c, d). Ainda que o modelo tenha simulado de forma satisfatória a Bst, observa-se moderada subestimação nessa determinação. As observações de Morel, et al. (2020) também apresentaram subestimação em grande parte das simulações, em comparação com os valores medidos, o que está em conformidade com os resultados obtidos na presente pesquisa para essa variável.

Morel et al. (2020) relatam que os fatores latitude e ângulo de inserção da folha podem induzir o modelo a subestimar os valores simulados, apontando para a necessidade da realização de pesquisas nesse sentido, para melhor análise e

calibração do modelo em situações de altas latitudes. Muito embora, os dados da presente pesquisa tenham sido gerados em baixas latitudes, os indícios da influência das altas latitudes na simulação do modelo com subestimação precisam ser avaliados em situações de baixas latitudes, para se averiguar com mais perícia os módulos de fenologia do milho no “APSIM-Milho”, tendo em vista um número grande de variáveis envolvidas nesse processo.

Portanto, considerando os dados simulados, percebe-se que o APSIM é capaz de simular o desenvolvimento do milho dentro dos limites do erro experimental numa série de dados observados para o cultivar em questão, considerando o ambiente e práticas de gestão impostas. Desse modo, deve-se considerar o adequado desempenho da simulação ao longo das séries de dados observados no norte piauiense.

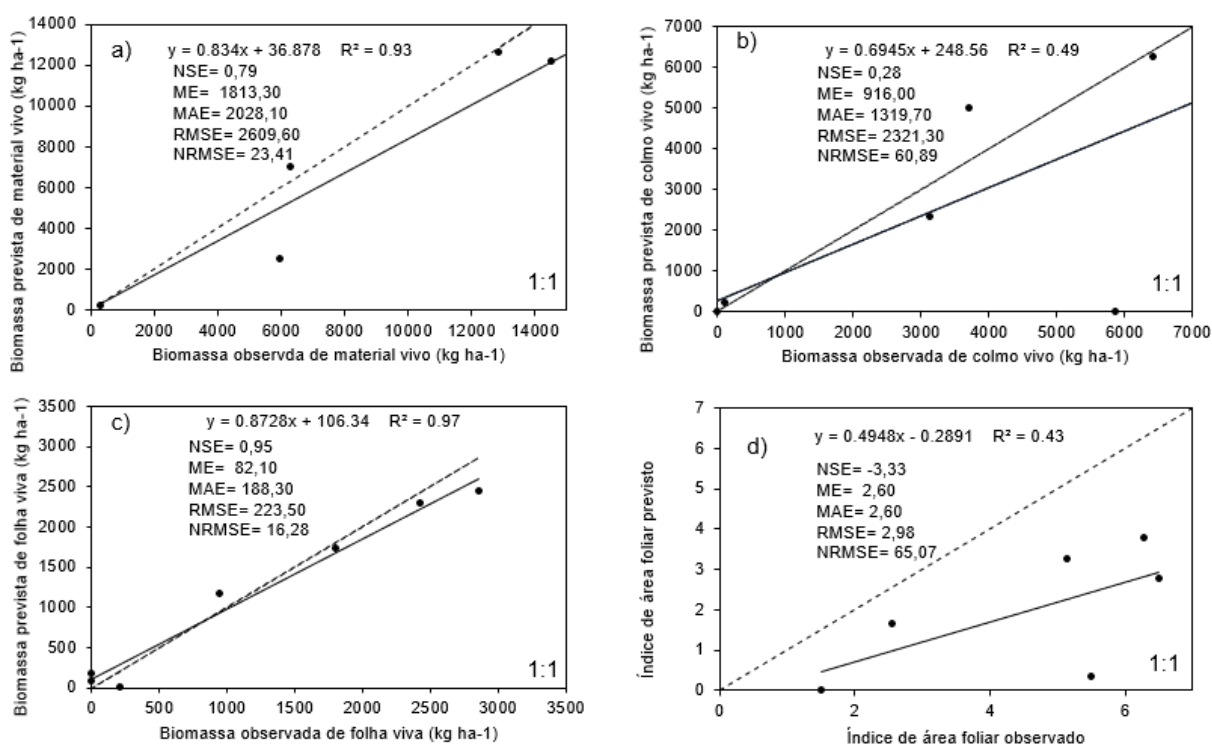


Figura 17 Relações entre a massa viva de milho e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

As simulações das partições Biomassa seca de grãos (Bsg, kg ha⁻¹), Biomassa seca de palha (Bsp, kg ha⁻¹) e Biomassa seca de ráquis (Bsr, kg ha⁻¹) são apresentadas nas Figuras (18e, f, g), respectivamente.

O modelo simulou de forma satisfatória, indicando precisão com R² variando entre 0,94 a 0,98 para as partições Bsg, Bsp e Bsr, respectivamente, enquanto que o coeficiente de eficiência NSE variou entre (0,88 a 97), respectivamente. A forte correlação entre os dados simulados e observados e a boa eficiência da simulação sustentam as métricas de Bsg (ME=807,40 kg ha⁻¹, MAE=1048,50 kg ha⁻¹, RMSE=1260,90 kg ha⁻¹, NRMSE=17,87%), bem como os valores fornecidos para Bsp com (ME=53,00 kg ha⁻¹, MAE=76,90 kg ha⁻¹, RMSE=87,30 kg ha⁻¹, NRMSE=8,18%) e Bsr com valores de (ME=-18,10 kg ha⁻¹, MAE=103,80 kg ha⁻¹, RMSE=121,80 kg ha⁻¹, NRMSE=8,44%), sugerindo que o modelo apresentou boa performance nas simulações para os componentes de rendimento (Figura 14e, f, g).

No final do ciclo, o rendimento do milho simulado e observado ficaram em torno de 9.906,2 kg ha⁻¹ e 9.475,2 kg ha⁻¹, respectivamente, com simulação fornecida pelo modelo considerada satisfatória. Utilizando a simulação com o modelo APSIM, ainda que em condições edafoclimáticas diferentes, as observações de Gaydon et al., (2017), em pesquisa realizada em sistemas de cultivo na Ásia, forneceram resultados similares para rendimento de grãos de milho, sustentando a capacidade do modelo de simular o rendimento da cultura em diferentes condições edafoclimáticas e manejos. Ainda que exista considerável variabilidade espaço-temporal do rendimento do milho com relação aos aspectos de manejo e desenvolvimento da cultura, Vian et al. (2016), em pesquisas realizadas com o APSIM, apontam a capacidade de o modelo simular o rendimento do milho, no entanto, apresentando algumas inconsistências em comparação aos dados simulados, inerentes ao genótipo, clima, solo e manejo (Duarte et al., 2020).

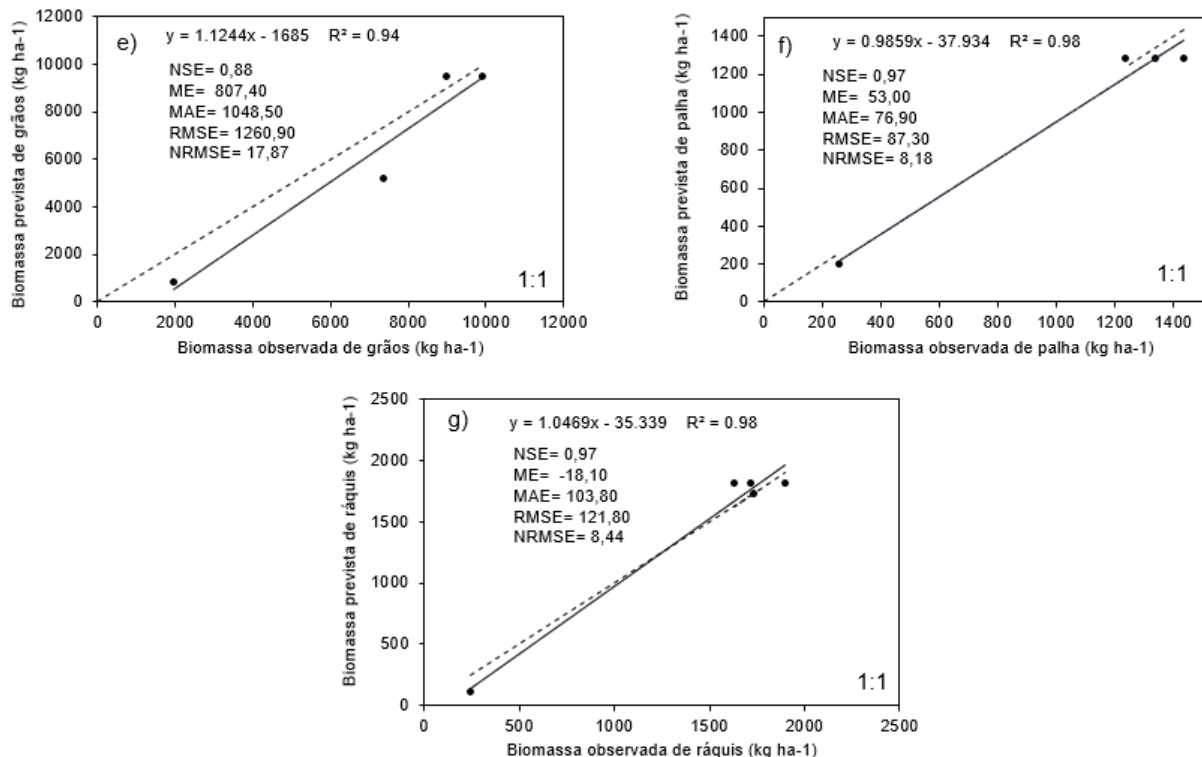


Figura 18 Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema solteiro, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.1.4 Milho consorciado com braquiária *Ruziziensis*

Os dados de radiação e água disponível no solo observados e previstos para cultivo de milho em sistema consorciado com capim braquiária *Ruziziensis*, no presente estudo, são apresentados nas (Figuras 19a, b), respectivamente.

Os valores máximos e mínimos diários de radiação solar, observados entre a germinação e a colheita ficaram em torno de 17,39 e 9,07 MJ m⁻², respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos previstos pelo modelo ficaram entre 13,79 e 0,06 MJ m⁻², respectivamente (Figura 19a).

O modelo subestimou a simulação da interceptação da radiação, comparada às observações diárias a partir da metade do ciclo de coletas. Isso sugere que o modelo talvez tenha simulado a realidade fisiológica da planta e os dados observados foram camuflados pela presença de folhas senescentes ainda presas nas plantas de milho, além da elongação do caule das plantas de braquiárias em função da competição por luz com o milho.

O modelo simulou os dados de água disponível no solo, seguindo a mesma tendência das observações. Os valores máximos e mínimos diários de água disponível no solo observados entre a germinação e a colheita ficaram em torno de 165,79 e 154,56 mm, representando 0,14 e 0,13 mm mm⁻¹, respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos de água disponível no solo previstos pelo modelo APSIM ficaram em torno de 155,58 e 140,27 mm, o que representa limiares de 0,14 e 0,12 mm mm⁻¹, respectivamente (Figura 19b).

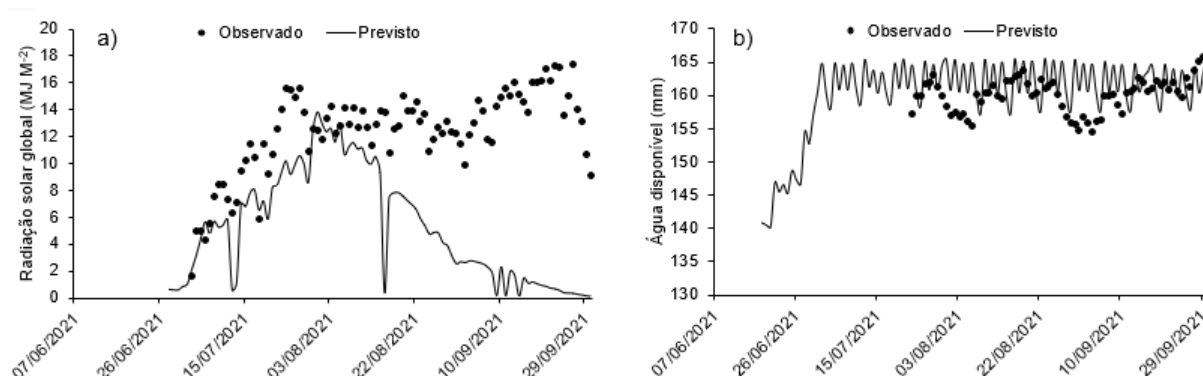


Figura 19 Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 1,2 m), observada e prevista, utilizadas na parametrização do milho cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

A parametrização do modelo de milho consorciado teve como base os parâmetros calibrados para o milho solteiro. Os parâmetros fenológicos e os respectivos graus dias (GDA) calibrados para o modelo de milho estão descritos na Tabela 14.

As fases Juvenil e enchimentos de grãos demandaram maior tempo térmico (GDA), com relação a todas as fases durante o desenvolvimento da planta (Tabela 14). Os valores obtidos de GDA para o milho consorciado são similares aos dados obtidos na calibração do milho solteiro, sugerindo que o consórcio com o capim Braquiária Ruziziensis não afeta a exigência térmica do milho. O desenvolvimento fenológico das plantas tem influência direta da disponibilidade térmica, resultando em efeito benéfico para as plantas quando submetidas a locais ou períodos com temperaturas mais elevadas, sugerindo que a soma térmica pode ser utilizada para prever a duração de fases fenológicas e ciclo de desenvolvimento da cultura do milho (Wagner, et al., 2011).

A parametrização do modelo de milho consorciado teve como base o APSIM-Milho com os parâmetros genuínos, subsidiando a obtenção do melhor ajuste entre

dados observados e previstos para o milho consorciado. Os melhores ajustes obtidos dos parâmetros do submodelo foliar, caule, raízes, grãos, palha e ráquis estão descritos nas Tabelas 13 e 14, respectivamente, possibilitando a previsão de crescimento e rendimento da cultura em condição irrigada e estação seca.

Os principais parâmetros que sofreram mudanças no submodelo foliar, ajustados para as simulações que determinaram os cálculos de crescimento e rendimento da cultura com os melhores ajustes, foram a duração do crescimento da folha com mudanças no fator “y”, variando de 2 a 300 GD; duração do atraso da folha com mudanças no fator “y”, variando de 250 a 750 GD; duração da senescência foliar com mudanças no fator “y”, variando de 150 a 350 GD; área foliar específica máxima e mínima com mudanças importantes no fator “y”, variando de 10000 a 15000 mm² g⁻¹ e 20000 a 15000 mm² g⁻¹, respectivamente. Com relação à base inicial do APSIM, houve o acréscimo dos parâmetros fenologia da folha, fator “y”, variando de 100 a 1, além do parâmetro fator de competição da folha, valor padrão do fator “y”, variando de 1 a 0,3, conforme Tabela 13.

Na calibração dos parâmetros do submodelo de caule, houve o acréscimo do parâmetro taxa de senescência do caule calibrado, fator “y”, variando de 0 a 1; e a fração de partição do caule exigiu mudanças nos valores do fator “y”, variando de 0,5 a 0, conforme Tabela 13. Foram acrescentados ao submodelo radicular os parâmetros fator de aeração, com valor padrão do fator “y” (1mm dia⁻¹) e fator de estresse de profundidade da raiz, com valor padrão do fator “y” =1 (Tabela 13).

Tabela 13 Parâmetros do submodelo foliar, parametrizado para o milho, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido BM 709 PRO
Submodelo foliar			
Duração do crescimento	x: nó aparente	x: 0,0, 0,3; 0,5; 1,0	x: 0,0, 0,3; 0,5; 1,0
	y: (GD)	y: 0,5, 100; 125; 50	y: 2,0, 500; 600; 300
Duração do atraso	x: nº. de nós	x: 0,0; 0,5; 0,7; 0,8; 1,0	x: 0,0; 0,5; 0,7; 0,8; 1,0
	y: (GD)	y: 300; 300; 700; 900; 1300	y: 250; 250; 450; 550; 750
Duração da senescência	x: nó aparente	x: 0,0; 0,3; 0,5	x: 0,0; 0,3; 0,5
	y: (GD)	y: 500; 500; 700	y: 150; 150; 350
Área foliar específica máxima	x: folha aparente	x: 1,0; 6,0; 13,0; 20,0	x: 1,0; 6,0; 13,0; 20,0
	y: AFE (mm ² g ⁻¹)	y: 30000; 20000	y: 10000; 30000; 15000; 15000
Área foliar específica mínima	x: folha aparente	x: 1,0; 9,0	x: 1,0; 9,0
	y: AFE (mm ² g ⁻¹)	y: 25000; 15000	y: 20000; 15000
Coeficiente de extinção (k)	adimensional	3,0	3,0
Fator fenológico	x: estágio	-	x: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 5,109; 5,11; 5,2; 5,3; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0
	y: fator	-	y: 100; 100; 100; 100; 100; 50; 20; 10; 5; 1,5; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0
Fator de competição	x: (kg ha ⁻¹)	-	x: 0,0; 300; 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000
	y: fator	-	y: 1,0; 0,7; 0,7; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3
Submodelo caule			
Taxa de senescência	x: estágio	-	x: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 10,999; 11
	y: fração (0–1) dia ⁻¹	-	y: 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 1,0
Fração de partição	x: estágio	x: 3,0; 5,0; 6,0; 7,0; 7,001	x: 3,0; 5,0; 6,0; 7,0; 7,001
	y: g m ⁻²	y: 0,1; 1,0; 0,4; 0,0; 0,0	y: 0,5; 0,5; 1,0; 1,0; 0,0
Submodelo radicular			
Fator de aeração	x: (0-1)	-	x= 0,0; 0,03; 1,0
	y: fator (mm dia ⁻¹)	-	y= 1,0; 1,0; 1,0
Fator de estresse de profundidade de raiz	0-1	-	1,0
Funções de demanda de nutrientes	x: (estágios)	0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0	0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0
	y: g m ⁻¹)	0,0; 0,0; 0,1; 0,1; 0,0	0,0; 0,0; 0,2; 0,2; 0,0

Os parâmetros do submodelo grãos, calibrados para o milho cultivado em sistema consorciado, foram similares aos valores dos parâmetros calibrados para o milho solteiro, sugerindo que o consórcio não afeta a fisiologia da planta em relação à formação de grãos.

No submodelo palha do milho consorciado com o capim braquiária Ruziziensis, houve mudanças nos parâmetros estágio inicial da palha de (5,70 para 5,22), duração do crescimento de (330 para 500 GD) e o peso máximo de palha mudou de (30 para 35g); além da inclusão do parâmetro fator de competição_estrutural, fornecendo os melhores ajustes aos dados simulados pelo modelo, em comparação com os dados observados (Tabela 14).

No submodelo ráquis, foi acrescentado o parâmetro fator de competição com valor padrão calibrado para variável “x” 5000 g m⁻² e o fator “y” com valor=0,3, respectivamente. Os parâmetros estágio inicial da ráquis mudou a fase de 5,80 para 5,23, duração do crescimento da ráquis mudou de 900 para 300 GD e peso máximo da ráquis mudou de 23 para 37g, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 Parâmetros do submodelo de palha e ráquis parametrizado para o milho, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime irrigado, avaliado entre junho e setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido BM 709 PRO
Submodelo palha			
Estágio inicial da palha	Fase	5,70	5,22
Duração do crescimento	(GD)	330	500
Peso máximo da palha	g	30	35,0
Fator de competição	x: (g m ⁻²)	-	x:0; 300; 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000
	y: fator (0-1)	-	Y:1; 0,9; 0,9; 0,9; 0,9; 0,9; 0,9; 0,9
Submodelo ráquis			
Estágio Inicial da ráquis	Fase	5,80	5,23
Duração do crescimento	Tempo	900	300
Peso máximo da ráquis	g	23	37
Fator de estresse	x: fator	-	0,0; 300; 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000
	y: (0-1)	-	1,0; 0,7; 0,5; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3;

O modelo simulou de forma satisfatória o crescimento acumulado da cultura em escala diária com relação a Bst, Bsc, Bsf, ainda que tenha superestimado o acúmulo diário de Bsf (Figuras (20a, b, c). O desenvolvimento do IAF também foi simulado de

forma satisfatória, porém com leve subestimação no início do ciclo e superestimação ao longo do restante do ciclo de desenvolvimento da cultura, comparando-se os dados observados com a série de dados previstos (Figura 20d). Chisanga, et al. (2021) considerou a simulação do IAF de 3,02 a 3,35 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ imprecisa, com um R^2 variando entre 0,15 a 0,60, para as três cultivares de milho avaliadas. Em contraste, os resultados da presente pesquisa forneceram um IAF máximo de 3,29 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ e um $R^2=0,75$, indicando satisfatória precisão na simulação da referida variável (Figura 20d). A variável IAF é um importante indicador de crescimento da planta de milho (Hoogenboom, et al., 1999).

Dessa forma, as medições de campo ou laboratório dessa variável são necessárias para avaliar adequadamente o modelo de cultivo. As observações de Zhao et al. (2022) para essa mesma variável apresentaram resultados similares entre cultivares; no entanto, houve variação de valores entre as diferentes estações, demonstrando a necessidade de rigor para determinação da referida variável. A determinação do IAF passa por uma série de etapas para sua obtenção, o que pode aumentar a variabilidade de erros sistemáticos, podendo, eventualmente, prejudicar as previsões pelo modelo.

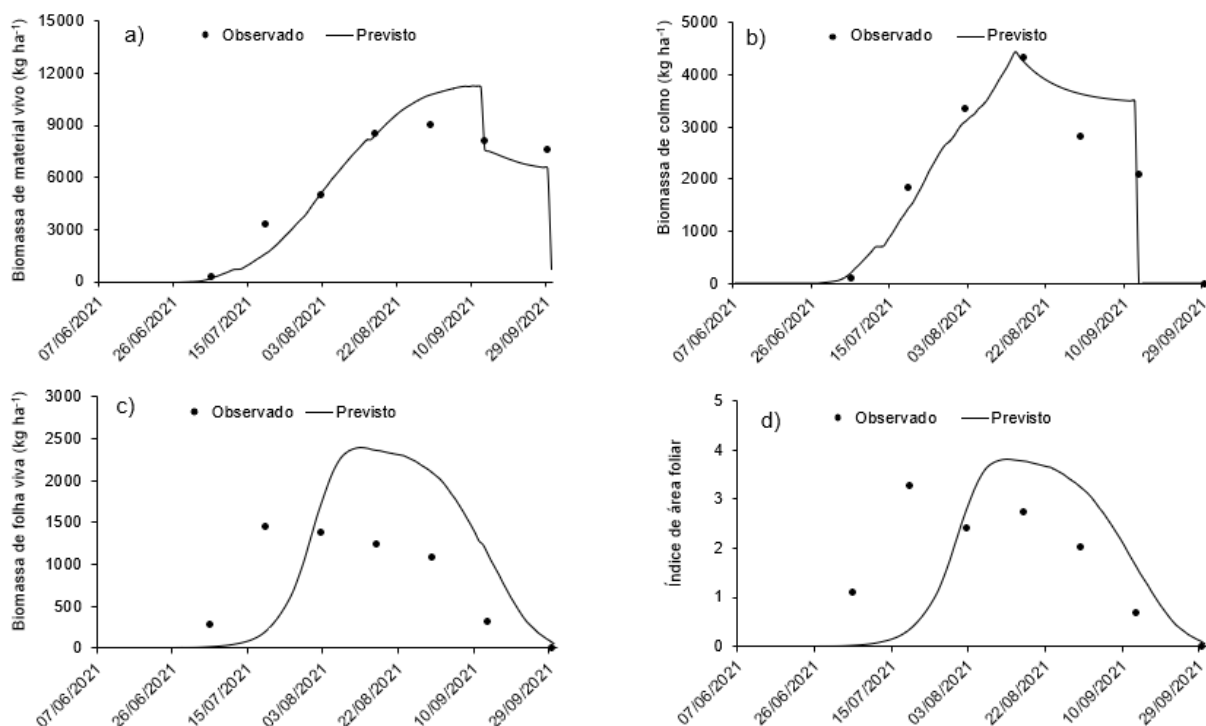


Figura 20 Variação de massa viva e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do milho cultivado em sistema consorciado, sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

O modelo foi capaz de capturar os efeitos de manejo e ambiente, expressando o desenvolvimento dos componentes de rendimento das partições (palha, ráquis e grãos) de forma satisfatória, apresentando bom ajuste do desenvolvimento da cultura em escala diária (Figura 21e, f, g). As observações da presente pesquisa também mostraram queda de rendimento do milho consorciado (Figura 21g), quando comparado com o milho solteiro (Figura 16g).

O principal componente de rendimento do milho é o grão, o qual teve o desenvolvimento simulado de forma satisfatória pelo modelo APSIM-Milho, quando comparados com os dados observados. O rendimento acumulado, observado na última coleta de dados, ficou em torno de 5.688,10 kg ha⁻¹ contra 4.693,33 kg ha⁻¹ de rendimento simulado, respectivamente.

Os resultados observados por Ceccon et al. (2018), em pesquisa para avaliar a produtividade de grãos e de massa de milho, solteiro e consorciado com populações de plantas de duas espécies de Braquiária (*brizantha* cv. Marandu e *Ruziziensis*), apontaram que o incremento populacional de plantas de braquiária promoveu o aumento do rendimento de massa no sistema; entretanto, reduziu a produtividade de massa do milho. Os mesmos autores relataram que o aumento de plantas de braquiária por metro quadrado promoveu uma queda de rendimento de grãos no milho consorciado, reportando o melhor rendimento de grãos em torno de 5.800 kg ha⁻¹ com população de 10 plantas m⁻², em consórcio com braquiária *Ruziziensis*.

Por outro lado, vale ressaltar que na presente pesquisa, no milho cultivado em sistema consorciado, houve competição com ervas daninhas, além da competição com o capim braquiária, o que possivelmente tenha penalizado o milho em detrimento do rendimento, demonstrando que o cultivo em sistemas consorciados requer cuidados quanto ao manejo populacional no sistema de cultivo, além do emprego de tecnologia quanto ao manejo nutricional.

O rendimento do milho consorciado com o capim braquiária *Ruziziensis* em observações desta pesquisa teve uma queda de rendimento de aproximadamente 50%, quando comparado com o milho em cultivo solteiro, o que possivelmente tenha sido causado pela competição interespecífica por nutrientes e fatores climáticos (Costa et al., 2012). Nessa mesma linha de observações, Oliveira et al. (2022) relataram que o milho solteiro superou em 14,3% a massa do milho consorciado com *Urochloa Ruziziensis*, reforçando a hipótese da competição das espécies por fatores

e produção para se obter rendimento econômico da cultura de grãos e da formação e produção de biomassa da pastagem (Kluthcouski; Yokoyama, 2003).

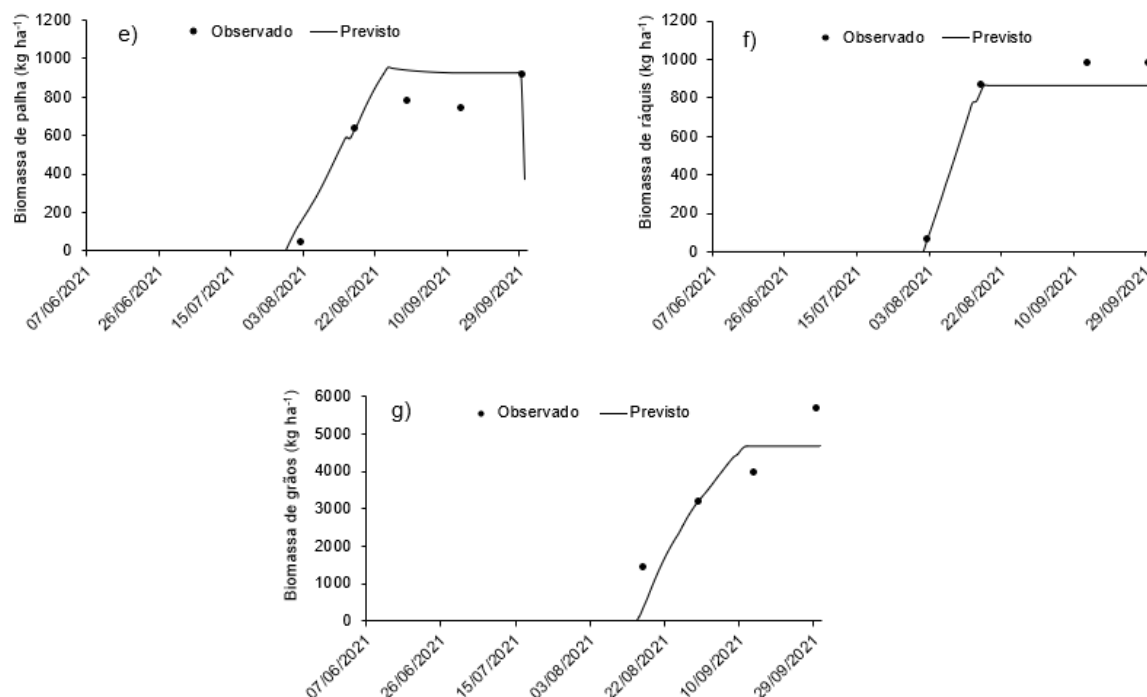


Figura 21 Variação de massa de palha, ráquis e grãos, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil

A calibração do milho produzido em sistema consorciado teve como base inicial os parâmetros calibrados para o milho solteiro, apresentados nas Tabelas 11 e 12, resultando nos melhores ajustes de dados analíticos e métricas dos valores previstos de: Biomassa seca total de material vivo (Bst, kg ha⁻¹); Biomassa seca de folha viva (Bsf, kg ha⁻¹); Biomassa seca de colmo vivo (Bsc, kg ha⁻¹); e o Índice de área foliar (IAF); apresentados nas Figura (22a, b, c, d). Além da Biomassa seca de grãos (Bsg, kg ha⁻¹), Biomassa seca de palha (Bsp, kg ha⁻¹), Biomassa seca de ráquis (Bsr, kg ha⁻¹), apresentadas nas Figuras (23e, f, g).

As simulações de dados previstos de Bst e Bsc foram satisfatórias, com boa precisão com $R^2=0,93$ e $0,77$ e boa acurácia com $NSE=0,92$ e $0,74$, respectivamente (Figuras 22a, b). O modelo também simulou com precisão e exatidão os dados do IAF, com $R^2=0,75$ e $NSE=0,62$, respectivamente (Figura 22d). A forte correlação e boa eficiência, fornecidas pelo modelo entre os dados simulados e observados, sustentam os dados de Bsc com $ME=279,40$ kg ha⁻¹; $MAE=535,10$ kg ha⁻¹; $RMSE=867,80$ kg ha⁻¹; e IAF com $ME=-0,43$; $MAE=0,80$; e $RMSE=0$; além do NRMSE

de Bst, Bsc e IAF variando entre 16,81% e 50,56%, com todas as previsões consideradas entre razoáveis e boas, conforme descrito por Jamieson et al. (1991), Heinemann et al. (2012) (Figura 20a, b, c, d). Em contraste, o modelo simulou com insatisfatória precisão a Bsf com $R^2=0,30$, além de insatisfatória acurácia (NSE=0,21), com valores das métricas no limiar de ME=-257,70 kg ha⁻¹; MAE=698,80 kg ha⁻¹; RMSE=823,70 kg ha⁻¹, conforme Figura 18c (Moriasi et al., 2007).

Em pesquisa com aplicação do modelo APSIM, Zhang et al. (2023) também apontaram inconsistência na simulação da biomassa foliar, no entanto, as pesquisas desenvolvidas com simulações em sistemas consorciados ainda são escassas, indicando a necessidade da realização de mais pesquisas nesse sentido, para melhor entender a dinâmica das culturas, quando submetidas ao sistema consorciado, e avaliar melhor o desempenho do APSIM.

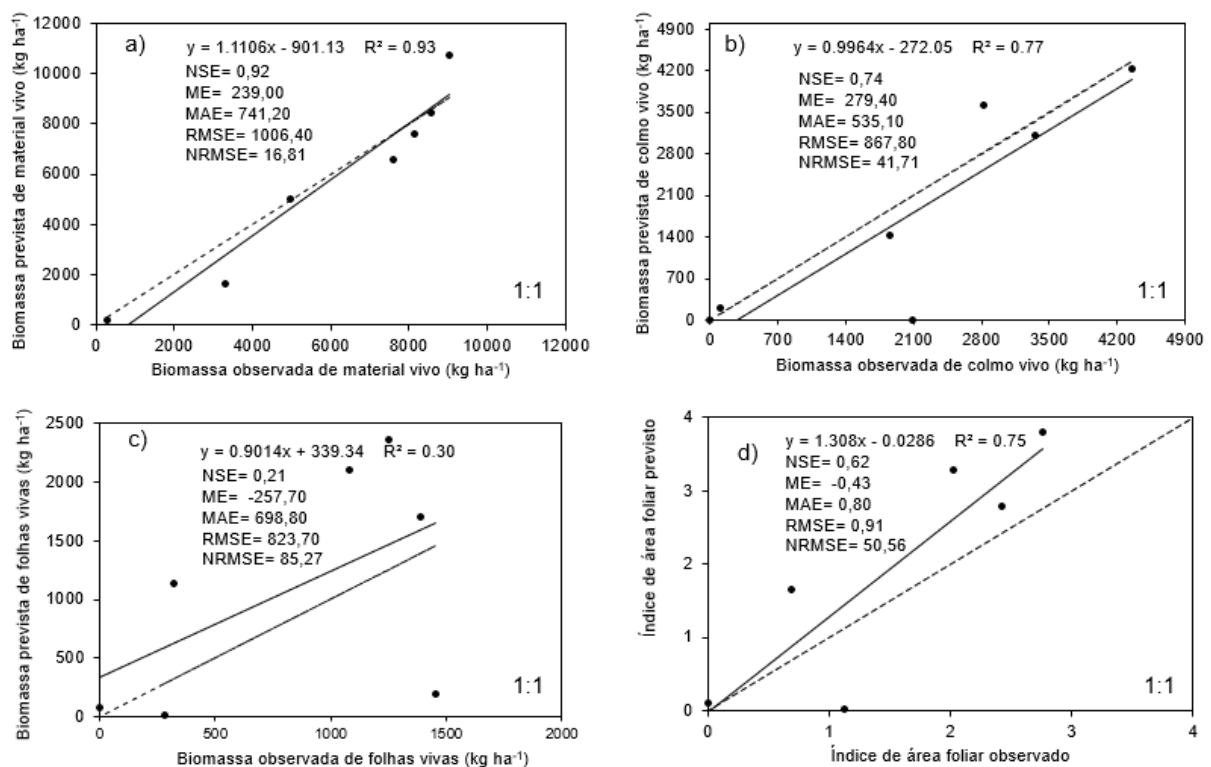


Figura 22 Relações entre a massa viva e o índice de área foliar, observadas e previstas, para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

O modelo APSIM simulou de forma satisfatória as partições de Biomassa seca de grãos (Bsg, kg ha⁻¹), Biomassa seca de palha (Bsp, kg ha⁻¹) e Biomassa seca de

ráquis (Bsr, kg ha⁻¹), com boa precisão e exatidão (Figuras 23e, f, g). O coeficiente de determinação variou entre $R^2=0,79$ e $0,93$, enquanto o coeficiente de eficiência, variou entre $NSE=0,88$ a $0,97$. A forte correlação entre os dados simulados e observados sustentam as métricas de Bsg com ($ME=337,90$ kg ha⁻¹, $MAE=704,30$ kg ha⁻¹ e $RMSE=819,10$ kg ha⁻¹); Bsp com ($ME=-87,70$ kg ha⁻¹, $MAE=93,40$ kg ha⁻¹, $RMSE=118,20$ kg ha⁻¹); e Bsr com ($ME=73,30$ kg ha⁻¹, $MAE=73,30$ kg ha⁻¹, $RMSE=84,40$ kg ha⁻¹).

Os valores do NRMSE de Bsr, Bsg e Bsp variaram entre 15,19% a 26,41%), com todas as previsões consideradas razoável, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012) (Figuras 23e, f, g). Pesquisa realizada por Ojeda, et al. (2018), com a cultura do milho, testando diferentes ambientes e manejo, mostraram os resultados com divergência nas simulações, variando de boa a ruim, com RMSE variando entre 835 a 2099 kg ha⁻¹ para rendimento de grãos, comparando diferentes ambientes, sugerindo que a mudança de ambiente provoca mudança de comportamento no desenvolvimento da cultura.

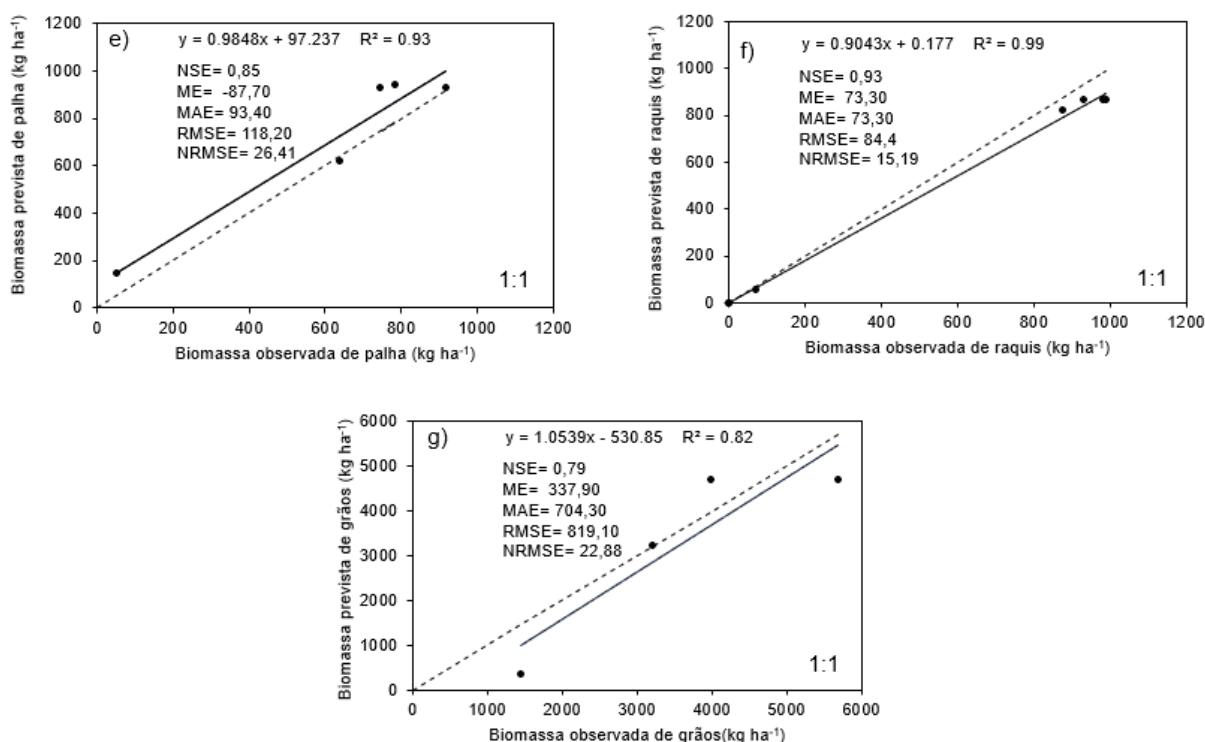


Figura 23 Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime irrigado, em ensaio experimental realizado no período de junho a setembro de 2021, Teresina-Piauí, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.2 Ensaio conduzido visando à parametrização do modelo APSIM

5.2.1 Braquiária Marandu solteira

Os dados de radiação e água disponível no solo camada (0 a 0,9 m), observados e previstos no presente estudo em escala diária, obtidos em sistema de cultivo solteiro sob regime sequeiro do capim braquiária Marandu, estão apresentados na Figura 24a, b. Os valores máximos e mínimos diários de radiação solar, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 4,14 e 0,14 MJ m⁻², respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos previstos pelo modelo APSIM foram 4,28 e 0,52 MJ m⁻², respectivamente (Figura 24a). O modelo simulou de forma satisfatória os dados de radiação, seguindo a mesma tendência de dados observados para série de dados do período, sugerindo que o modelo é capaz de simular de forma satisfatória a radiação incidente no sistema.

Os valores diários, máximo e mínimo de água disponível no solo, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 109,47 e 96,41mm, na camada de 0-0,9m, equivalente a 1,21 e 1,07 mm cm⁻¹, respectivamente, enquanto os valores máximos e mínimos de água disponível no solo, previstos pelo modelo APSIM, ficaram em torno de 109,68 e 92,32mm, equivalentes a 1,21 e 1,02 mm cm⁻¹, respectivamente (Figura 24b).

A simulação de água disponível no solo no perfil (0,0 a 0,9m) seguiu o mesmo padrão de dados observados em escala diária (Figura 24b), sugerindo que o modelo é capaz de prever a dinâmica de água no solo. A razão da consistência do ajuste de dados simulados de água no solo em sequeiro é sustentada pela grande variação nos valores de máximos e mínimos de água no solo, aumentando a amplitude entre os valores, o que causa uma maior dispersão de valores, quando comparados com os observados em sistemas irrigados (Souza, et al., 2022).

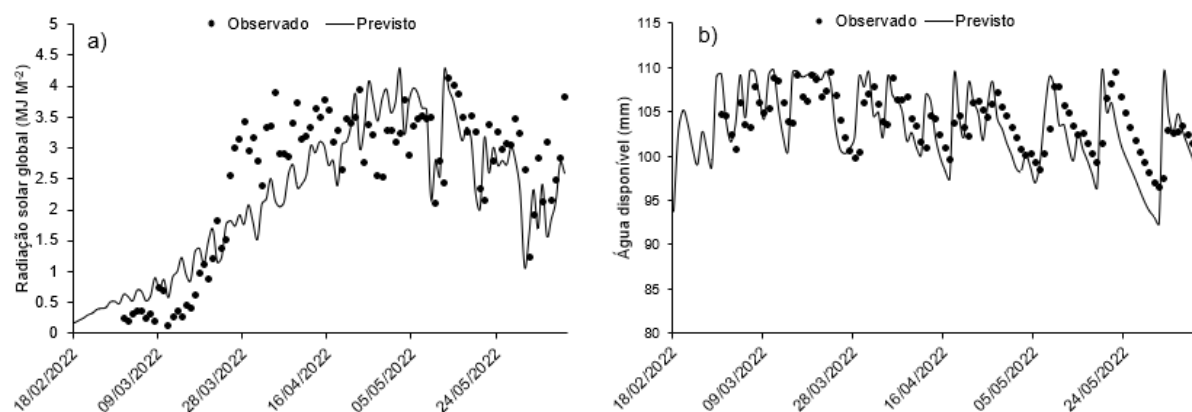


Figura 24 Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e estimada, utilizada na parametrização do capim braquiária Marandu, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em cultivo realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os valores de fotoperíodo crítico para mudanças de fases da cultura, ajustados conforme as diferentes partições de biomassa (folha, caule, raiz e órgãos de reserva), foram mantidos conforme os mesmos valores utilizados na calibração do modelo com a braquiária *Ruziziensis*, assumindo que os materiais utilizados são similares quanto à exigência térmica e fotoperíodo (Tabela 15).

Tabela 15 Frações da partição estrutural de acordo com as fases fenológicas da planta e respectivo fotoperíodo crítico indicador de mudança de fase, utilizados na parametrização do capim braquiária *Marandu*, produzido em sistema de cultivo solteiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022 em Brejo-Maranhão, Brasil

Nº	Fase fenológica	Duração do dia (horas)	Particionamento			
			Folha	Calmo	Raiz	Órgãos
0	Germinação	-	0,50	0,12	0,33	0,05
1	Emergência	-	0,50	0,12	0,33	0,05
2	Juvenil	-	0,50	0,19	0,30	0,01
3	Vegetativo 1	11,91	0,40	0,39	0,20	0,01
4	Reprodutivo 1	12,50	0,60	0,40	0,00	0,00
5	Reprodutivo 2	11,40	0,55	0,40	0,05	0,00
6	Reprodutivo 3	11,00	0,55	0,44	0,01	0,00
7	Vegetativo2 ^a	10,70	0,55	0,24	0,20	0,01

^a Após a fase Vegetativa 2, um mecanismo “GoToPhase” muda a simulação para a fase Vegetativa1 gerando uma simulação cíclica para pastagens perenes estabelecidas.

A eficiência do uso da radiação RUE, calculada para o capim Marandu com valor de 3,11 g MJ⁻¹, destacou-se como um dos principais parâmetros nos cálculos de crescimento da planta, utilizando-se a temperatura base de 10,3 °C, conforme Souza

et al. (2021) e as temperaturas ótimas, conforme Bosi et al. (2020) (Figura 25). A RUE da planta inteira foi de $1,94 \text{ g MJ}^{-1}$, admitindo 20% dos fotoassimilados direcionados ao desenvolvimento radicular e assumindo que 50% da radiação interceptada é PAR.

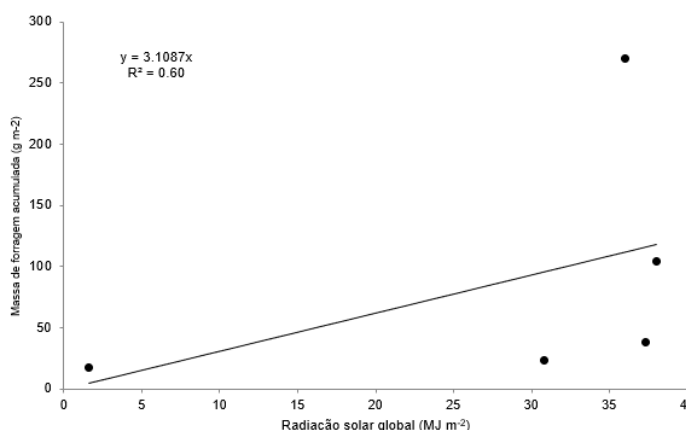


Figura 25 Regressão linear entre acúmulo de forragem (g m^{-2}) e radiação solar global interceptada (MJ m^{-2}) para capim braquiária Marandu, avaliado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

O melhor ajuste de dados previstos em função dos dados observados por ocasião da parametrização do modelo APSIM ocorreu com o acréscimo dos parâmetros coeficiente de extinção padrão; função de altura da planta; fator de floração; fator de índice de área foliar (IAF); índice de área foliar mínimo (IAF_m) e um coeficiente de extinção de material morto, conforme apresentados na Tabela 17. Além do acréscimo de parâmetros, houve a necessidade de pequenos ajustes nos valores dos parâmetros, conforme Tabela 16.

No submodelo de caule, houve ajustes apenas nos valores do parâmetro taxa de senescência do caule no fator “y”, em função da variável “x”, conforme os estágios de desenvolvimento da planta (Tabela 16). No submodelo de órgãos, ocorreram pequenos ajustes, conforme descrito na Tabela 16. No submodelo radicular, houve o acréscimo dos parâmetros fator de florescimento da raiz; fator de IAF ligado a raiz; fator de retranslocação de N na raiz; retranslocação de N na raiz ligado ao IAF, com seus devidos valores descritos na Tabela 16. As mudanças e acréscimos de parâmetros ocorreram devido ao modelo não conseguir capturar de forma satisfatória as simulações para as variáveis analisadas. As mudanças de ambiente, de manejo e de genótipos, na segunda etapa de coleta de dados, talvez seja a resposta para justificar as referidas mudanças e acréscimo de parâmetros no processo de validação do modelo APSIM.

Tabela 16 Parâmetros do submodelo foliar, caule, órgãos e raiz do APSIM-Pasto Tropical, utilizado na parametrização do capim braquiária *Marandu*, produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetro	Unidade	Valor Piatã	Valor Marandu
Submodelo foliar			
Coeficiente de extinção padrão	x: estágio	-	x: 0,0; 0,18; 2,0
	y: padrão	-	y: 1,0; 0,66; 0,66
Função de altura	x: massa	-	x: 0,0; 100; 1000
	y: função	-	y: 0,0; 100; 700
Coeficiente de extinção de luz (k)	adimensional	0,65	0,67
Tempo de residência da folha	dias	80	40
Fator de floração	x: estagio	-	x: 0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0
	y: fator	-	y: 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 0,9; 0,7; 1,0
Fator de IAF	x:iaf	-	x: 0; 6; 7
	y: fator	-	y: 1; 1; 0,9
Eficiência do uso da radiação (RUE)	g MJ ⁻¹	1,44	1,94
Fator de temperatura (Ft)	x: temperatura (°C)	x: 8,9; 30,2; 40,0; 45,0	x: 10,3; 30,2; 40,0; 45,0
	y: Ft valor	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0
	x: concentração de N	x: 0,005; 0,021	x: 0,0; 1,0; 1,5
	y: (g g ⁻¹)	y: 0,0; 1,0	y: 0,0; 1,0; 1,0
Fator de déficit hídrico (Fw)	x: fw	x: 0,0; 1,0	x: 0,0; 0,8; 1,0
	y: fw (0-1)	y: 0,0; 1,0	y: 0,0; 1,0; 1,0
Índice de área foliar mínimo (IAF)	m ² m ⁻²	-	0,1
Coeficiente de extinção de material morto	adimensional	-	0,57
Área foliar específica máxima	x: idade (anos)	x: 0,0; 0,3; 0,7	x: 0,0; 0,3; 0,6; 0,7; 2,0
	y: SLA (m ² g ⁻¹)	y: 0,015; 0,018; 0,020	y: 0,017; 0,018; 0,020; 0,023; 0,023
Área foliar específica ligado ao fator Fw	x: fw	x: 0,0; 0,8; 1,0	x: 0,0; 0,8; 1,0
	y: fator	y: 0,0; 0,4; 1,0	y: 0,0; 1,0; 1,0
Submodelo de caule			
Taxa de senescência do caule	x:estágio	x:0,0;1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0	x:0,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0

	y: fração (0-1) dia ⁻¹	y:0,005; 0,005; 0,005; 0,005; 0,005; 0,005; 0,015; 0,015	y:0,0; 0,0; 0,0; 0,25, 0,25, 0,5
Submodelo de órgãos			
DM fator de florescimento de órgãos	x :estágio	x:0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0	x:0,0; 0,94; 0,95; 1,1; 1,11
	y: fator	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0;
DM Fator de IAF de órgãos	x :fotoperíodo	x:0,0; 0,01; 0,77; 1,2; 1,21; 7,0	x:0,0; 0,76; 0,77; 1,2; 1,21; 7,0
	y: fator	y:2,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0
Submodelo radicular			
Modificador de absorção de água (KL)	x: iaf	x: 0,0; 5,0; 10,0	x: 0,0; 3,0; 10,0
	y: fator	y: 1,0; 1,1; 1,2	y: 1,0; 1,0; 1,0
Modificador de absorção de NO ₃ (KNO ₃)	x: dens. da raiz	x: 0,0; 0,08	x: 0,0; 0,003
	y: absorção de NO ₃	y: 0,03; 0,03	y: 0,03; 0,03
Modificador de absorção de NH ₄ (KNH ₄)	x: dens. da raiz	x: 0,0; 0,08	y: 0,0; 0,003
	y: absorção de NH ₄	y: 0,0; 0,0;	x: 0,0; 0,0;
DM fator de florescimento na raiz	x :estágio	-	x:0; 0,71; 0,72; 1,21; 1,12; 1,82; 1,83; 2,32; 2,33; 2,82; 2,83; 3,32; 2,33; 5
	y: fator	-	y:0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
DM fator de IAF ligado a raiz	x :fotoperíodo	-	x:0; 0,76; 0,77; 1,2; 1,21; 2
	y: iaf dia ⁻¹	-	y: 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0;
Retranslocação de N (FN) na raiz	x: (g dia ⁻¹)	-	x:0,0; 0,45; 1,0; 1,5
	y: fator (N)	-	y:1,0; 0,0; 0,0
Retransl. de N na raiz ligado ao (IAF)	x: iaf dia ⁻¹	-	x:0,0; 1,0; 7,0
	y:1,0; 0,0; 0,0	-	y:1,0; 1,0; 1,0

Os dados previstos em escala diária, em comparação com os dados observados para o desenvolvimento acumulado de Bst, Bsc, Bsf e IAF, são apresentados nas Figuras 26a, b, c, d. O modelo simulou de forma satisfatória os dados observados, seguindo o mesmo padrão de desenvolvimento da Bst, Bsc e Bsf (Figuras 26a, b e c). Em contraste, o modelo superestimou os valores de IAF (Figura 26d). Com relação ao IAF, o modelo capturou os efeitos do ambiente e manejo de forma insatisfatória. Nessa linha, Bosi et al. (2020) considerou a simulação da biomassa viva de forragem satisfatória, com R^2 variando entre 0,89 e 0,94, e muito boa exatidão, com NSE de 0,88 a 0,92; no entanto, considerou as simulações insatisfatórias a boas para o IAF, o que pode estar ligado à variabilidade de fatores para determinação dessa variável.

O modelo foi capaz de capturar de forma satisfatória a tendência de crescimento da Bst, Bsc, Bsf, dando boa resposta aos efeitos de ambiente e manejo imposto ao sistema (Figuras 26a, b, c). Os relatos de Gomes et al. (2020) demonstram que o APSIM simulou a biomassa viva com muito boa precisão e boa exatidão ($R^2=0,83$, e $NSE=0,75$), com a braquiária Marandu em sistema de cultivo solteiro, reforçando a capacidade de o modelo simular de forma satisfatória a biomassa viva de pastagens tropicais em diferentes ambientes, sob diferentes manejos. Ainda em conformidade com os resultados da presente pesquisa, Souza et al. (2022) considerou como precisa a simulação de biomassa viva com $R^2=0,75$, massa de folha com $R^2=0,86$ e o IAF com $R^2=0,80$, em sistema sequeiro e irrigado; contudo, o APSIM apresentou melhor eficiência com NSE de 0,65 apenas para variável folha, e as demais variáveis foram simuladas de forma insatisfatória de acordo com esse índice. As variações na precisão das simulações podem estar ligadas a erros sistemáticos na manipulação das amostras ou aos efeitos de ambiente sob o genótipo.

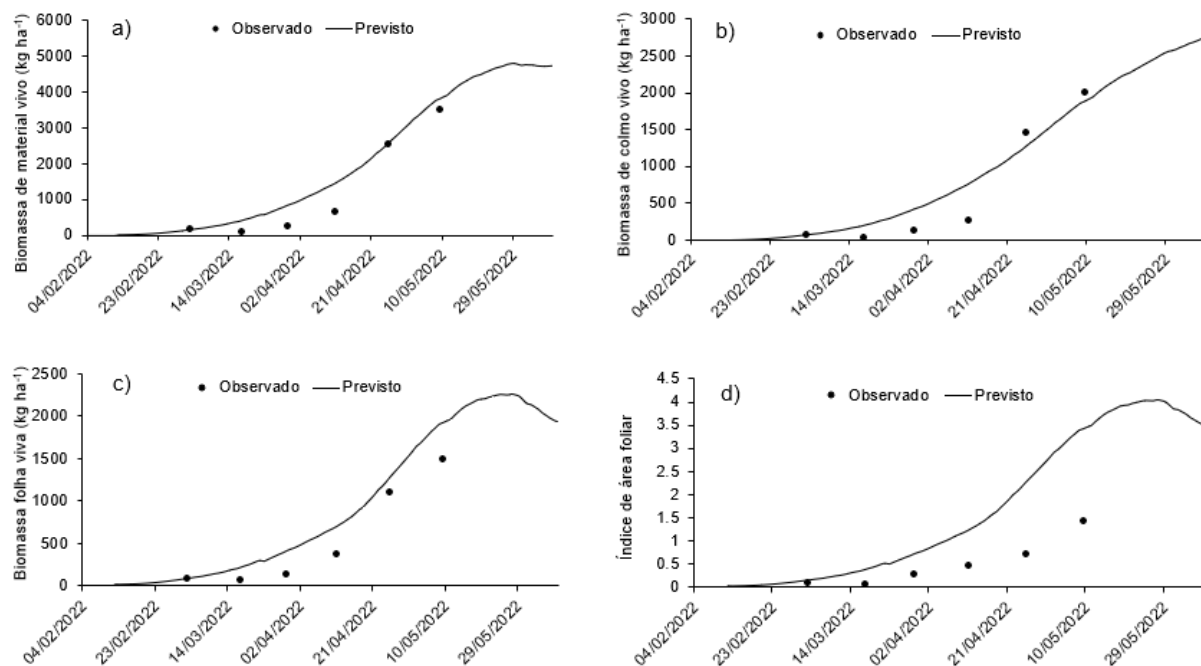


Figura 26 Variação de massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro e regime sequeiro, em cultivo realizado no período de fevereiro a junho de 2022, em Brejo-Maranhão, Brasil

Os resultados das análises para comparação dos valores observados e previstos de Biomassa seca total de material vivo acima do solo (Bst , kg ha^{-1}); Biomassa seca de folha viva (Bsf , kg ha^{-1}); Biomassa seca de colmo vivo (Bsc , kg ha^{-1}) e Índice de área foliar (IAF) do capim braquiária Marandu estão descritos nas (Figuras 27a, b, c, d). O modelo APSIM foi capaz de simular o crescimento da planta e suas partições no processo de parametrização, fornecendo simulações de satisfatória a muito boa. A simulação da Bst apresentou boa precisão, com $R^2=0,95$, boa acurácia, com $NSE=0,88$ (Figura 27a). Esses resultados estão em conformidade com os encontrados por Sousa et al. (2022), que obtiveram satisfatória simulação da Bst do capim braquiária Marandu, por ocasião da validação do APSIM.

Ainda com relação à simulação de Bst , o APSIM forneceu métricas dos erros de forma satisfatória para todos os parâmetros avaliados com valores de $ME=-325,50 \text{ kg ha}^{-1}$, $MAE=333,90 \text{ kg ha}^{-1}$, $RMSE=439,60 \text{ kg ha}^{-1}$, sustentadas pela forte correlação entre dados simulados e observados. Por outro lado, o $NRMSE=36,13\%$ foi ruim, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), conforme Figura 27a.

O modelo conseguiu simular de forma satisfatória as partições de matéria seca entre os órgãos vivos acima do solo (colmo e folha), com boa precisão e exatidão, com $R^2=0,93$ e $NSE=0,84$ para colmo, e folha com $R^2=0,97$ e $NSE=0,82$,

respectivamente (Figuras 27b, c). As simulações para o índice de área foliar também apresentaram boa precisão $R^2=0,97$; por outro lado, apresentou insatisfatória acurácia, com $NSE=0,08$. Os baixos valores dos erros obtidas para Bsf com ($ME=-228,60$ kg ha⁻¹, $MAE=228,70$ kg ha⁻¹, $RMSE=266,10$ kg ha⁻¹); para Bsc com ($ME=96,90$ kg ha⁻¹, $MAE=211,10$ kg ha⁻¹, $RMSE=256,30$ kg ha⁻¹); e IAF com ($ME=-0,85$, $MAE=0,85$, $RMSE=1,09$) foram considerados bons. Em contraste, os valores de NRMSE foram todos ruins, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012). Os resultados obtidos por Bosi et al., 2020, ainda que na parametrização do APSIM, para o capim braquiária Piatã, confirmaram a capacidade de o modelo simular o desenvolvimento de pastagens tropicais, quando confrontamos os resultados obtidos na presente pesquisa. Os trabalhos realizados com pastagens tropicais por Pequeno et al. (2014), Pequeno et al. (2018) e Santos et al. (2019) também estão de acordo com as métricas das simulações da Bst para o capim braquiária Marandu, na presente pesquisa, reforçando a boa performance do modelo na simulação de pastagens tropicais.

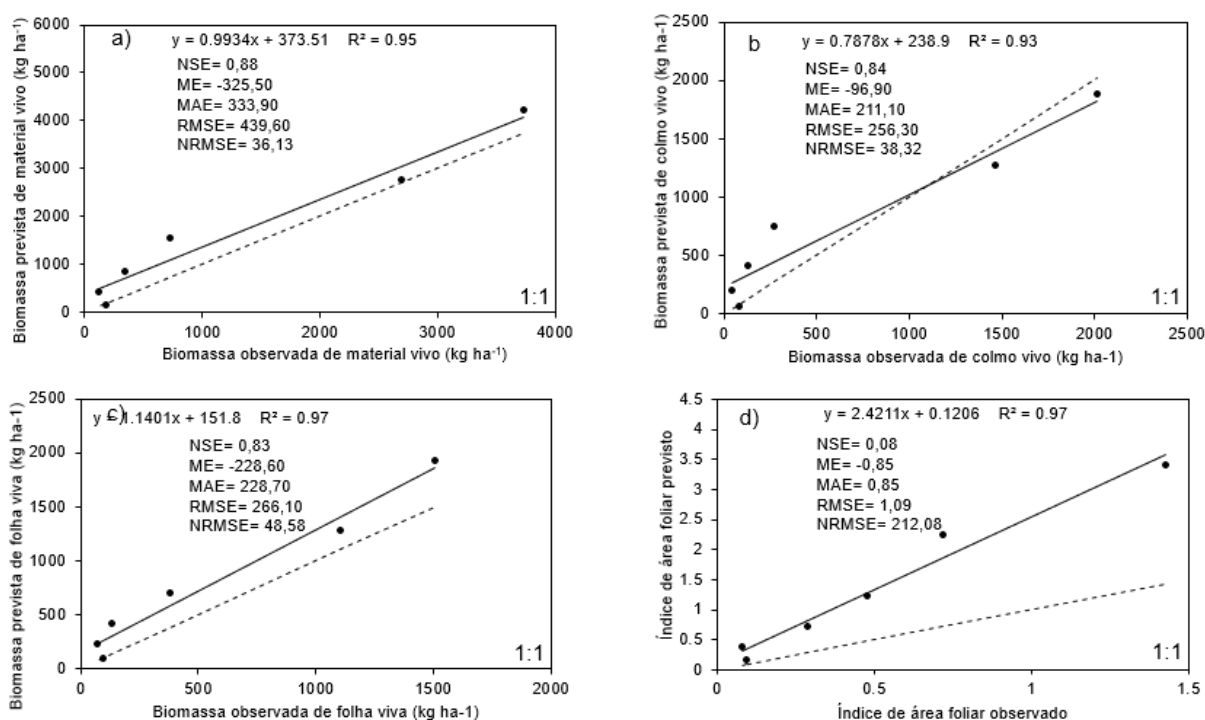


Figura 27 Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro em regime sequeiro, avaliado no período de fevereiro a junho 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.2.2 Braquiária Marandu consorciada

Os dados de radiação e água disponível no solo camada (0,0 a 0,9m), observados e previstos para cultivo do capim braquiária Marandu, consorciada com milho, são apresentados nas Figuras 28a, b, respectivamente. Os valores máximos e mínimos diários de radiação solar global, observados durante o ciclo reprodutivo da cultura, ficaram em torno de 3,48 e 0,13 MJ m⁻², respectivamente.

O modelo capturou com inconsistência os dados previstos de radiação, em comparação com os dados observados, o que se sustenta na hipótese de que o acréscimo da penalidade de aplicação de herbicida no submódulo “operations” do modelo APSIM, simulando o manejo adotado pelo produtor, pode ter suprimido a capacidade de previsão de dados de radiação, conforme observa-se na Figura 28a. Todo esse resultado foi comprometido pela aplicação do herbicida. O modelo não foi capaz de simular o retardo no desenvolvimento do capim, tendo em vista que o modelo matou o capim no início do ciclo reprodutivo, Figura 28a.

Os valores máximos e mínimos em escala diária de água disponível no solo, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 165,30 e 147,51 mm, equivalentes a 1,83 e 1,63 mm cm⁻¹, respectivamente, enquanto que os valores máximos e mínimos de água disponível no solo, previstos pelo modelo APSIM, ficaram em torno de 164,62 e 142,45 mm, respectivamente, equivalentes a 1,82 e 1,58 mm cm⁻¹, respectivamente (Figura 28b).

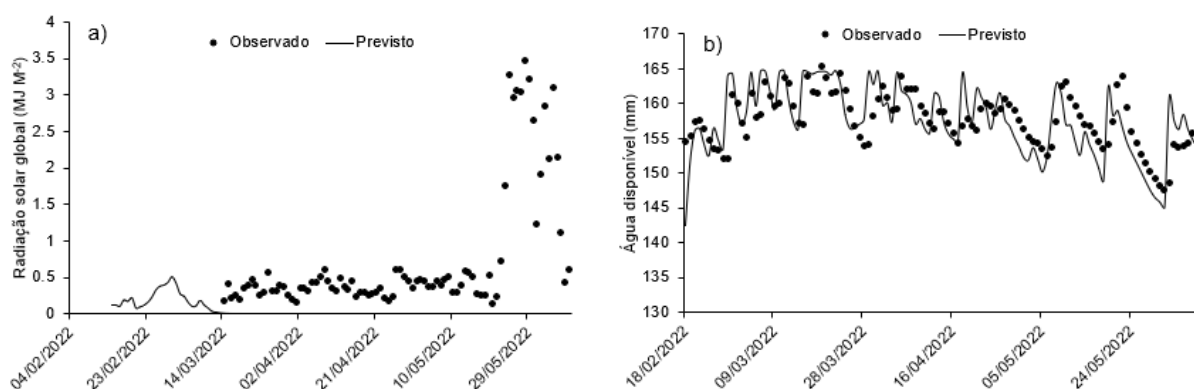


Figura 28 Variação de radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e estimada, utilizada na parametrização do capim braquiária Marandu, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os valores de fotoperíodo crítico para mudanças de fases da cultura, ajustados conforme as diferentes partições de biomassa (folha, caule, raiz e órgãos de reserva)

para o capim Marandu, em consórcio com o milho, foram similares aos valores fornecidos ao capim Marandu em cultivo solteiro (Tabela 16).

Assim como no cultivo solteiro, o capim Marandu cultivado em consórcio com o milho teve o tempo termal como mediador entre a germinação e a fase Juvenil; e a transição da partição de biomassa da fase Vegetativa para as fases Reprodutiva foram mediadas pelo fotoperíodo, variando entre 10,70 a 12,50h (Tabela 17).

A exigência de fotoperíodo do capim braquiária Marandu, cultivado em sistema consorciado, foi similar entre as mudanças de fases, quando comparado ao capim braquiária Marandu em cultivo solteiro, assim como as partições de fotoassimilados entre as diferentes fases, conforme Tabela 17.

A similaridade entre os valores de fotoperíodo obtidos para o capim braquiária Marandu em sistema de cultivo solteiro com os valores do consórcio sugerem que o sistema de cultivo consorciado não afeta a exigência de fotoperíodo e tempo termal do capim braquiária Marandu, durante seu desenvolvimento fenológico.

Os parâmetros que forneceram os melhores ajustes de dados previstos para o capim braquiária Marandu, em função dos dados observados por ocasião da parametrização do modelo APSIM, estão descritos na Tabela 17. Os parâmetros de parametrização da braquiária Marandu consorciada com milho, cultivados sob regime sequeiro, foram similares aos parâmetros utilizados na parametrização da braquiária Marandu em sistema de cultivo solteiro, submetida ao regime sequeiro, conforme Tabela 16.

Tabela 17 Parâmetros do submodelo foliar do APSIM-Pasto Tropical, utilizados na parametrização do capim braquiária *Marandu*, produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo- Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Piatã	Valor Marandu
Submodelo foliar			
Coefficiente de extinção de luz (k)	adimensional	0,65	0,67
Coefficiente de extinção de luz padrão (k)	x:idade (anos)	-	x: 0; 0,18; 2
	y:valor do fator	-	y: 1,0; 0,66; 0,66
Fator de sombreamento da folha	x:fração de rad. transmitida	-	x:0; 0,6; 0,8; 0,9; 1
	y:valor do fator	-	y: 7; 6; 5; 4; 1
Fator de IAF	x:iaf	-	x: 0; 6; 7
	y:fator	-	y: 1; 1; 0,9
Fator de floração	x:estágio	-	x: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7
	y:fator	-	y: 1; 1; 1; 1; 1; 0,9; 0,7; 1
Eficiência do uso da radiação padrão	g MJ ⁻¹	1,44	1,94
Fator de sombreamento	x:radiação	-	x:0; 0,6; 0,8; 0,9; 1
	y:g MJ ⁻¹	-	y: 1,8; 1,8; 1,8; 1; 1
Fator de temperatura (Ft)	x:temperatura (°C)	x: 8,9; 30,2; 40,0; 45,0	x: 10,3; 30,2; 40,0; 45,0
	y:Ft valor	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0	y: 0,0; 1,0; 1,0; 0,0
Fator de nitrogênio (Fn)	x:concentração de N	x: 0,005; 0,021	x: 0,0; 1,0; 1,5
	(g g ⁻¹)	y: 0,0; 1,0	y: 0,0; 1,0; 1,0
Fator de déficit hídrico (Fw)	x:demanda de água	x: 0,0; 1,0	x: 0,0; 0,8; 1,0
	y:Fw valor	y: 0,0; 1,0	y: 0,0; 1,0; 1,0
IAF mínimo	m ² m ⁻²	-	0,1
Area foliar específica máxima	x:idade	x: 0,0; 0,3; 0,7	x: 0,0; 0,03; 0,6; 0,7; 2,0
	y:SLA (m ² g ⁻¹)	y: 0,015; 0,018; 0,020	y: 0,017; 0,018; 0,02; 0,023; 0,023
Fator de água ligado a AFE (Padrão)	x:Fw	x: 0,0; 0,8; 1,0	x: 0,0; 0,8; 1,0
	y:fator	y: 0,0; 0,4; 1,0	y: 0,0; 1,0; 1,0
Submodelo de caule			
Taxa de senescência do caule	x :estágio	x:0,0;1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0	x:0,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0
	y: fração (0-1) dia ⁻¹	y:0,005; 0,005; 0,005; 0,005; 0,005; 0,015; 0,015	y:0,0; 0,0; 0,0; 0,025; 0,025; 0,005

Submodelo de órgãos			
DM do fator de florescimento de órgãos	x:estágio	x:0,0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0	x:0,0; 0,94; 0,95; 1,1; 1,11
	Y:fator	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0;
DM do fator de IAF ligado aos órgãos	x :fotoperíodo	x:0,0; 0,01; 0,77; 1,2; 1,21; 7,0	x:0,0; 0,76; 0,77; 1,2; 1,21; 7,0
	y: fator	y:2,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0	y:1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0; 1,0
Submodelo radicular			
Modificador de absorção de água (KL)	x:iaf	x: 0,0; 5,0; 10,0	x:0,0; 3,0; 10,0
	y: fator	y: 1,0; 1,1; 1,2	y:1,0; 1,0; 1,0
Modificador de absorção de NO ₃ (KNO ₃)	x:dens. do comp. da raiz	x: 0,0; 0,08	x:0,0; 0,003
	y:absorção de NO ₃	y: 0,03; 0,03	y:0,03; 0,03
Modificador de absorção de NH ₄ (KNH ₄)	x:dens. do comp. da raiz	y: 0,0; 0,08	y:0,0; 0,003
	y:absorção de NH ₄	x: 0,0; 0,0;	x:0,0; 0,0;
Modificador de absorção de água (KL)	x:iaf	x: 0,0; 5,0; 10,0	x:0,0; 3,0; 10,0
	y: fator	y: 1,0; 1,1; 1,2	y:1,0; 1,0; 1,0
Modificador de absorção de NO ₃ (KNO ₃)	x:dens. do comp. da raiz	x: 0,0; 0,08	x:0,0; 0,003
	y:absorção de NO ₃	y: 0,03; 0,03	y:0,03; 0,03
Modificador de absorção de NH ₄ (KNH ₄)	x:dens. do comp. da raiz	y: 0,0; 0,08	y:0,0; 0,003
	y:absorção de NH ₄	x: 0,0; 0,0;	x:0,0; 0,0; x:0; 0,71; 0,72; 1,21; 1,12; 1,82; 1,83; 2,32; 2,33; 2,82; 2,83; 3,32; 2,33; 5
DM Fator de florescimento de raiz	x:estágio	-	y:0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0
	y:fator	-	
DM Fator de IAF ligado à raiz	x:fotoperíodo	-	x:0; 0,76; 0,77; 1,2; 1,21; 2
	x:iaf dia ⁻¹	-	y:0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0; 0,0;
Potencial retranslocação de N (FN) raiz	x:(g dia ⁻¹)	-	x:0,0; 0,45; 1,0; 1,5
	y: fator (N)	-	y:1,0; 0,0; 0,0
Retransl. de N na raiz ligado ao (IAF)	x:iaf	-	x:0,0; 1,0; 7,0
	y:fator	-	y:1,0; 1,0; 1,0

Os dados de crescimento acumulado de Bst, Bsc, Bsf e IAF em escala diária, observados e previstos do capim braquiária Marandu, cultivado em sistema consorciado com milho, são apresentados nas Figuras 29a, b, c, d.

O modelo não simulou de forma satisfatória o desenvolvimento da Bst, Bsc, Bsf e não capturou de forma satisfatória a tendência de crescimento de nenhuma das variáveis analisadas, sugerindo que o modelo não conseguiu capturar os efeitos de ambiente e manejo impostos ao sistema (Figuras 27a, b, c, d). Contudo, vale ressaltar que a aplicação de herbicida, no início do ciclo de desenvolvimento do capim braquiária em sistema consorciado com milho, afetou o desenvolvimento da pastagem. Desse modo, sugere-se que os dados observados não representam a realidade do desenvolvimento do capim braquiária Marandu, quanto à produção de biomassa, o que possivelmente pode ter afetado a simulação por parte do modelo, apontando para novos estudos com a situação em questão para melhor análise do problema, tendo em vista que ainda não existem relatos na literatura com situações semelhantes.

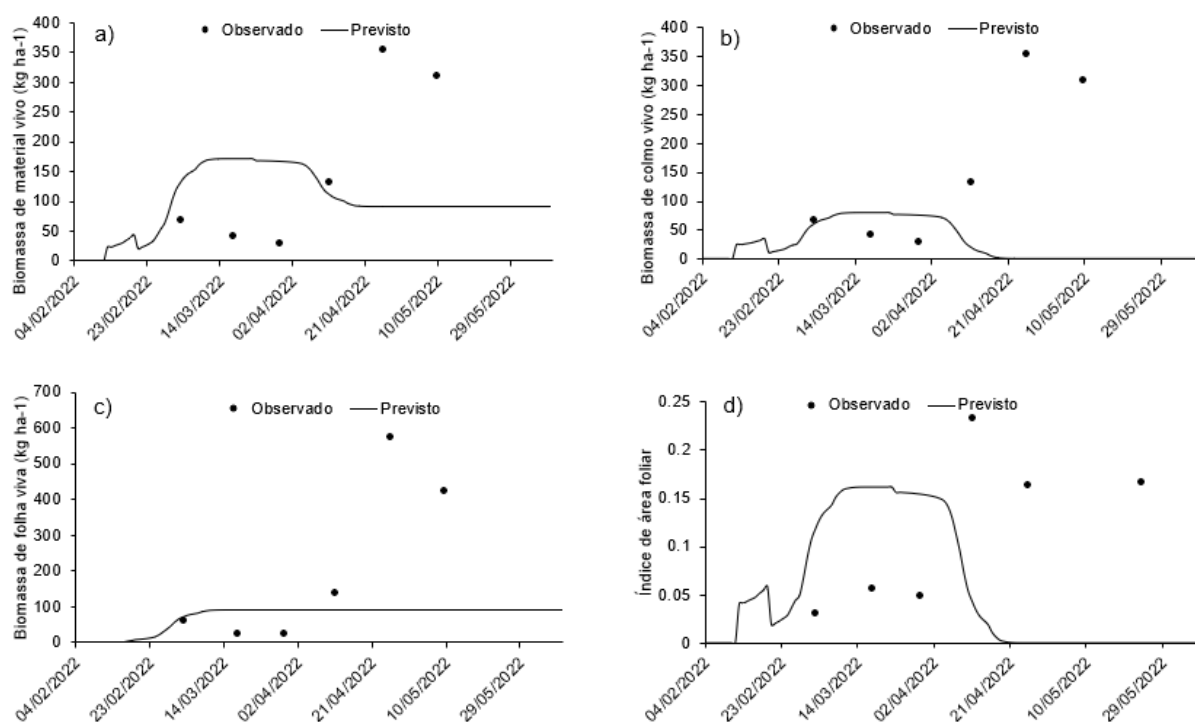


Figura 29 Variação de massa viva de forragem e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro e regime sequeiro, em cultivo realizado no período de fevereiro a junho de 2022, em Brejo-Maranhão, Brasil

Os resultados das análises para comparação dos valores observados e previstos de Biomassa seca total de material vivo acima do solo (Bst, kg ha⁻¹), Biomassa seca de folha viva (Bsf, kg ha⁻¹), Biomassa seca de colmo vivo (Bsc, kg ha⁻¹) e o Índice de área foliar IAF do capim braquiária Marandu estão descritos nas Figuras (30a, b, c, d).

O modelo APSIM simulou o crescimento da planta e suas partições, fornecendo simulações de satisfatória à insatisfatória. A simulação da Bst apresentou boa precisão, com $R^2=0,76$, e insatisfatória acurácia, $NSE=-184,41$ (Figura 28a). Os erros associados aos dados previstos de Bst, forneceram métricas satisfatórias sustentados pela forte correlação com valores ($ME=239,10$ kg ha⁻¹, $MAE=310,30$ kg ha⁻¹, e $RMSE=441,40$ kg ha⁻¹). Contudo, o ($NRMSE=120,35\%$) foi ruim, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), conforme Figura 30a.

O modelo simulou como boa à insatisfatória as partições de matéria seca entre os órgãos vivos acima do solo (folha e colmo) e insatisfatória eficiência, respectivamente. O modelo simulou a Bsf com boa precisão ($R^2=0,87$), porém com imprecisa eficiência com $NSE=-34,56$ (Figura 30c). A Bsc foi simulada com imprecisão $R^2=0,09$ e ineficiência $NSE=-1035,25$ (Figura 30b).

A simulação associada ao índice de área foliar forneceu satisfatória precisão, com $R^2=0,67$; contudo apresentou insatisfatória acurácia, com $NSE=-3,33$ (Figura 30d). Foram considerados razoáveis os erros associados a Bsf com $ME=118,00$ kg ha⁻¹; $MAE=145,60$ kg ha⁻¹; $RMSE=200,20$ kg ha⁻¹); para Bsc com valores $ME=121,10$ kg ha⁻¹; $MAE=167,10$ kg ha⁻¹; $RMSE=243,20$ kg ha⁻¹; e para o IAF com valores de $ME=0,04$; $MAE=0,14$; e $RMSE=0,14$. Em contraste, de acordo com Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), os valores de $NRMSE$ foram todos ruins (Figuras 30a, b, c, d). Os valores de NSE associados a todas as variáveis, obtidos com valores negativos, sugerem que a média dos valores observados para o presente trabalho é o melhor preditor do que o modelo para todas as variáveis em questão (Gaydon, et al., 2017).

Os baixos valores dos erros, associados às variáveis analisadas Bsf, Bsc, Bsf e IAF, talvez estejam relacionados ao baixo rendimento da cultura em função da aplicação de herbicida no início do período reprodutivo da braquiária Marandu, consorciada com milho. Por conseguinte, a baixa performance do modelo nas simulações das variáveis em questão, encontra explicação nos baixos valores de dados observados, os quais não representam a realidade de rendimento da cultura.

Os melhores resultados de biomassa viva observados na presente pesquisa, com valores aproximados de 970 kg ha^{-1} , contrastaram fortemente com as observações da biomassa viva obtida por Souza et al. (2021), os quais obtiveram valores de aproximadamente 8.900 kg ha^{-1} em escala temporal.

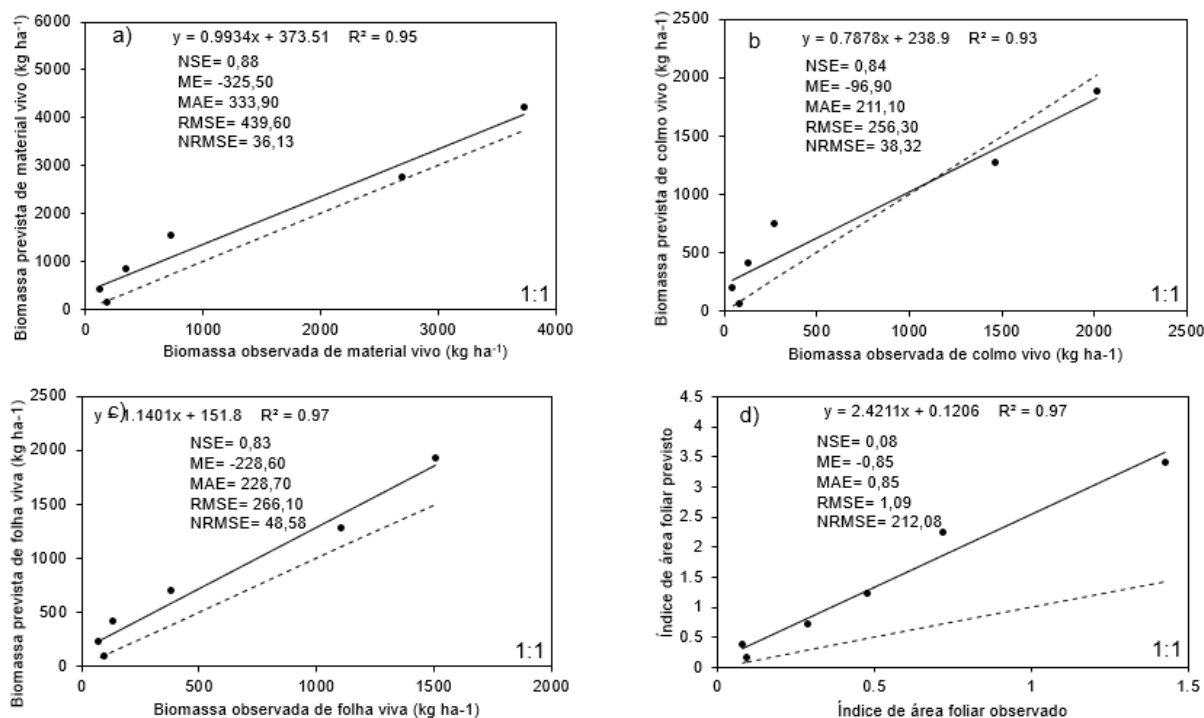


Figura 30 Relações entre a massa viva de forragem e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do capim braquiária Marandu, sob cultivo em sistema solteiro em regime sequeiro, avaliado no período de fevereiro a junho 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha^{-1}), Erro absoluto médio (MAE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha^{-1}), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.2.3 Milho solteiro

Os dados de radiação e de água disponível no solo, observados e previstos para cultivo de milho em sistema solteiro, são apresentados nas Figuras 31a e b, respectivamente. Os valores acumulados em escala diária máximos e mínimos de radiação solar observados e previstos, durante o ciclo reprodutivo da cultura, ficaram em torno de $5,20$ e $0,30 \text{ MJ m}^{-2}$ e $5,80$ e $0,01 \text{ MJ m}^{-2}$, respectivamente.

O modelo capturou de forma consistente os dados previstos de radiação em comparação com os dados observados, seguindo o mesmo padrão das observações, sugerindo que o modelo APSIM é capaz de simular a radiação interceptada pelo dossel da planta em sistema de cultivo solteiro e sob regime de sequeiro (Figura 31a).

No final da série de dados simulados, houve uma leve subestimação, talvez em função da morte das plantas capturada fisiologicamente pelo modelo; no entanto, a radiação continuou sendo interceptada pelas folhas, gerando dados observados, ainda que não fossem mais efetivas na realização de fotossíntese.

Os valores máximos e mínimos diários de água disponível no solo observados durante o ciclo reprodutivo da cultura ficaram em torno de 162,33 e 145,88 mm, equivalentes a 1,80 e 1,62 mm cm⁻¹, respectivamente, enquanto que os valores máximos e mínimos de água disponível no solo previstos pelo modelo APSIM ficaram em torno de 164,96 e 132,70 mm, equivalentes a 1,83 e 1,47 mm cm⁻¹, respectivamente, demonstrando que o modelo foi capaz de capturar a simulação de água disponível no solo na camada de (0 a 0,9m), de forma satisfatória, seguindo o mesmo padrão das observações (Figura 31b).

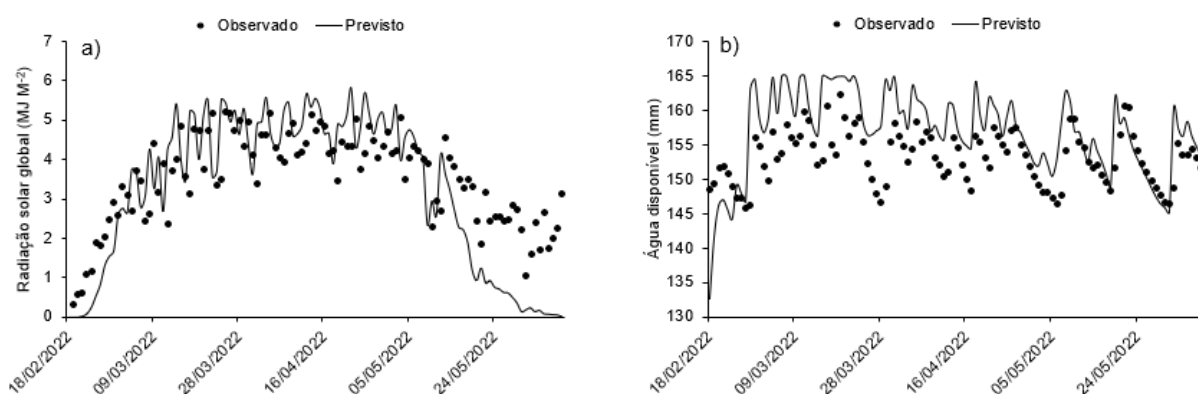


Figura 31 Variação da radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os parâmetros fenológicos utilizados na parametrização do modelo de milho solteiro e os respectivos graus dias (GDA) estão descritos na Tabela 18. A soma térmica influenciou de forma direta todas as mudanças de fases durante o desenvolvimento fenológico da cultura (Tabela 18). O modelo demonstrou que as fases que exigiram maior demanda térmica foram a Juvenil com 320 GAD e Enchimento de grãos com 550 GDA, seguidas pelo intervalo entre as fases de Floração e Enchimento de grãos com 50 GDA. Wagner et al. (2011), em suas observações, sugeriu que a soma térmica pode ser utilizada para prever a duração de fases fenológicas e ciclo de desenvolvimento da cultura do milho, sustentando o efeito

dessa variável nas simulações da presente pesquisa, para obtenção dos melhores resultados de dados simulados.

Tabela 18 Parâmetros fenológicos utilizados na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro na Fazenda Barbosa, Brejo-Maranhão, Brasil, 2022

Parâmetros	Valor utilizado	Descrição
1. Juvenil	320	GDA entre a emergência e o fim do estágio juvenil.
2. Folha bandeira-Floração	30	GDA entre a emissão da folha bandeira e floração.
3. Floração-enchimento de grãos	50	GDA do florescimento ao enchimento de grãos.
4. Enchimento de grãos	550	GDA do início ao fim de enchimento de grãos. GDA do fim do enchimento a maturação fisiológica de grãos.
5. Maturação de grãos	10	
6. Maturação-Colheita	10	GDA entre a maturação fisiológica e a colheita.
1 – GDA entre a emergência e a 4ª folha totalmente expandida (V4); 2 – GDA entre o florescimento (R1) à maturação fisiológica (R6); 3 – GDA entre dois dias após o pendoamento (VT) e o florescimento (R1); 4 – GDA entre o florescimento (R1) e o início enchimento de grãos (R2); 5 – GDA entre a maturação fisiológica (R6) e a colheita.		

Na parametrização do modelo de milho solteiro, foram realizadas mudanças nas variáveis e seus respectivos fatores. Dentre os parâmetros que sofreram mudanças, destacamos a duração do crescimento da folha, que mudou o valor padrão de 50 GD para 300 GD; duração do atraso da folha mudou de 1300 para 750 GD; duração da senescência da folha mudou de 700 para 350 GD; área foliar específica máxima mudou de 20000 para 15000 mm² g⁻¹; e a área foliar específica mínima que mudou de uma variação entre 25000 a 15000 mm² g⁻¹ para 20000 a 15000 mm² g⁻¹ (Tabela 19) Foi acrescentado o parâmetro fator fenológico da folha, em que a variável “x” tem relação com o fator de crescimento, com valor padrão do fator (y=1) no estágio 10 (Tabela 19). No submodelo de caule, o parâmetro taxa de senescência expressou seu pico máximo para variável “x” no (estágio=7,001), com valor (padrão=1); e no parâmetro fração de partição do caule no estágio (estágio=7,001), a fração de partição fator “y” ficou com valor (0 g m⁻²) (Tabela 19). No submodelo radicular, houve mudanças nos valores do fator “y” do parâmetro funções de DM de nutrientes, além do acréscimo dos parâmetros, fator de aeração e fator de estresse de profundidade da raiz (valor padrão do fator=1), para ambos os parâmetros, respectivamente, conforme (Tabela 19).

Tabela 19 Parâmetros do submodelo foliar, caule e raiz, utilizados na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido Status 3845
Submodelo foliar			
Duração do crescimento da folha	x: nº. de nós	x: 0; 0,3; 0,5; 1	x: 0; 0,3; 0,5; 1
	y: (GD)	y: 0,5; 100; 125; 50	y: 2,0; 500; 600; 300
Duração do atraso da folha	x: nº. de nós	x: 0; 0,5; 0,7; 0,8; 1	x: 0; 0,5; 0,7; 0,8; 1
	y: (GD)	y: 300; 300; 700; 900; 1300	y: 250; 250; 450; 550; 750
Duração da senescência da folha	x: no aparente	x: 0; 0,3; 0,5	x: 0; 0,3; 0,5
	y: (graus dia; GD)	y:500; 500; 700	y:150; 150; 350
Área foliar específica máxima	x: folha aparente	x: 1; 9	x: 1; 6; 13; 20
	y: SLA (mm ² g ⁻¹)	y: 30000; 20000	y: 10000; 30000; 15000; 15000
Área foliar específica mínima	x: folha aparente	x: 1; 9	x: 1; 9
	y: SLA (mm ² g ⁻¹)	y: 25000; 15000	y: 20000; 15000
Coefficiente de extinção de luz (k)	adimensional	3,0	4,5
Fator fenológico da folha	x: estágio	-	x: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 5,03; 5,04; 5,02; 5,3; 6; 7; 8; 9;10
	y: fator	-	y:500; 500; 500; 200; 100; 50; 50; 50; 50; 50; 10; 5; 1; 1
Submodelo de caule			
Taxa de senescência do caule	x: estágio	x:0	x:0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 10,999; 11
	y: fração (0-1) dia ⁻¹	y:0	y: 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 1
Fração de partição de caule	x: estágio	x: 3, 5; 6; 7; 7,001	x: 3, 5; 6; 7; 7,001
	y: g m ⁻²	y: 0,1; 1; 0,4; 0; 0	y: 0,5; 0,5; 1; 1; 0
Submodelo de raiz			
Fator de aeração	x:poros (0-1)	-	x:0,0; 0,03; 1
	y:(mm dia ⁻¹)	-	y:1,0; 1,0; 1,0
Fator estresse de profundidade de raiz	0-1	-	1,0
DM de nutrientes (fração de partição)	x:(estágio)	x:0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0	x:0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0
	y: g m ⁻¹)	y:0,0; 0,0; 0,1; 0,1; 0,0	y:0,0; 0,0; 0,5; 0,5; 0,0

O submodelo grãos não sofreu alteração nos seus valores com relação à base dos parâmetros do modelo de milho “APSIM-Milho”, por ocasião da parametrização. Nos parâmetros do submodelo palha, houve mudanças nas variáveis estágio inicial da palha, com mudança de fase de 5,70 para 5,08; duração do crescimento de 330 para 300 GD; e peso máximo de palha que mudou de 30 para 60 g. No submodelo ráquis, houve mudanças nos parâmetros estágio inicial da ráquis de 5,80 para 5,08, duração do crescimento de 900 para 600 GD e peso máximo de ráquis que mudou de 23 para 40 g, respectivamente, fornecendo os melhores ajustes no submodelo ráquis (Tabela 20).

Tabela 20 Parâmetros do submodelo de palha e ráquis parametrizado para o milho produzido em sistema de cultivo solteiro sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido Status 3845
Submodelo de palha			
Estágio inicial da palha	fase	5,70	5,08
Duração do crescimento da palha	tempo (GDA)	330,0	300,0
Peso máximo da palha	g	30,0	60,0
Submodelo de ráquis			
Estágio Inicial da ráquis	fase	5,80	5,08
Duração do crescimento da ráquis	(GDA)	900,0	600,0
Peso máximo da ráquis	g	23,0	40,0

O modelo foi capaz de simular de forma satisfatória a tendência de crescimento da variável Bst, capturando os efeitos de ambiente e de manejo impostos ao sistema, no entanto, o modelo capturou os dados previstos da Bsc com subestimação, até o final do ciclo de desenvolvimento da cultura, respectivamente (Figura 32a, b). Com relação à Bsf e o (IAF), o modelo conseguiu capturar os efeitos de manejo e ambiente, com subestimação e superestimação do desenvolvimento de folha e do IAF, ao longo do ciclo de desenvolvimento, respectivamente (Figura 32c, d).

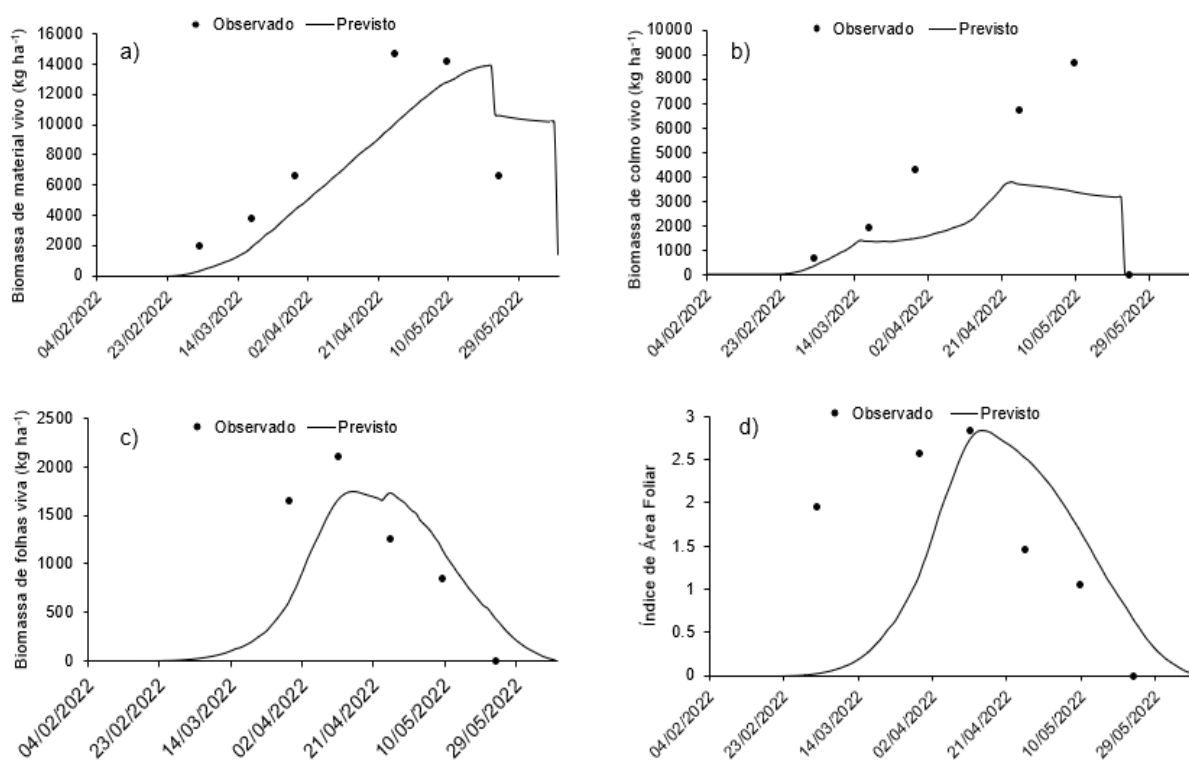


Figura 32 Variação de massa viva e o índice de área foliar, observados e previstos para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os valores de Biomassa seca de grãos Bsp, Biomassa seca de ráquis Bsr e Biomassa seca de grãos Bsg são apresentados na (Figura 33e, f, g). O modelo capturou de forma insatisfatória os efeitos de ambiente para os componentes de rendimento Bsp e Bsr, com superestimação, praticamente ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento (Figuras 33e e 33f). O modelo capturou os efeitos de manejo e ambiente, expressando o desenvolvimento de grãos, de forma satisfatória, apresentando bom ajuste dos dados previstos do desenvolvimento em escala diária, comparados aos dados observados; todavia, com superestimativa no final do ciclo de desenvolvimento de grãos, quando se comparam os valores observados de 4.578 kg ha⁻¹ aos valores previsto de 6.656 kg ha⁻¹ (Figura 33g). Contudo, vale ressaltar que os valores previstos de rendimento de grãos da cultura do milho, capturados pelo modelo, estão de acordo com os resultados obtidos em algumas pesquisas em volta do mundo, em cultivos sob diferentes condições de clima e manejo. Os resultados das simulações do rendimento de grãos de milho relatados por Chisanga et al. (2021) foram considerados aceitáveis em regime de sequeiro na Zâmbia; e Dong et al. (2023), em pesquisa realizada no nordeste da China, relataram que o APSIM capturou o

desenvolvimento fenológico e o rendimento do milho com forte correlação entre as simulações e as observações, com R^2 variando entre 0,92 e 0,96, atestando a eficácia do modelo.

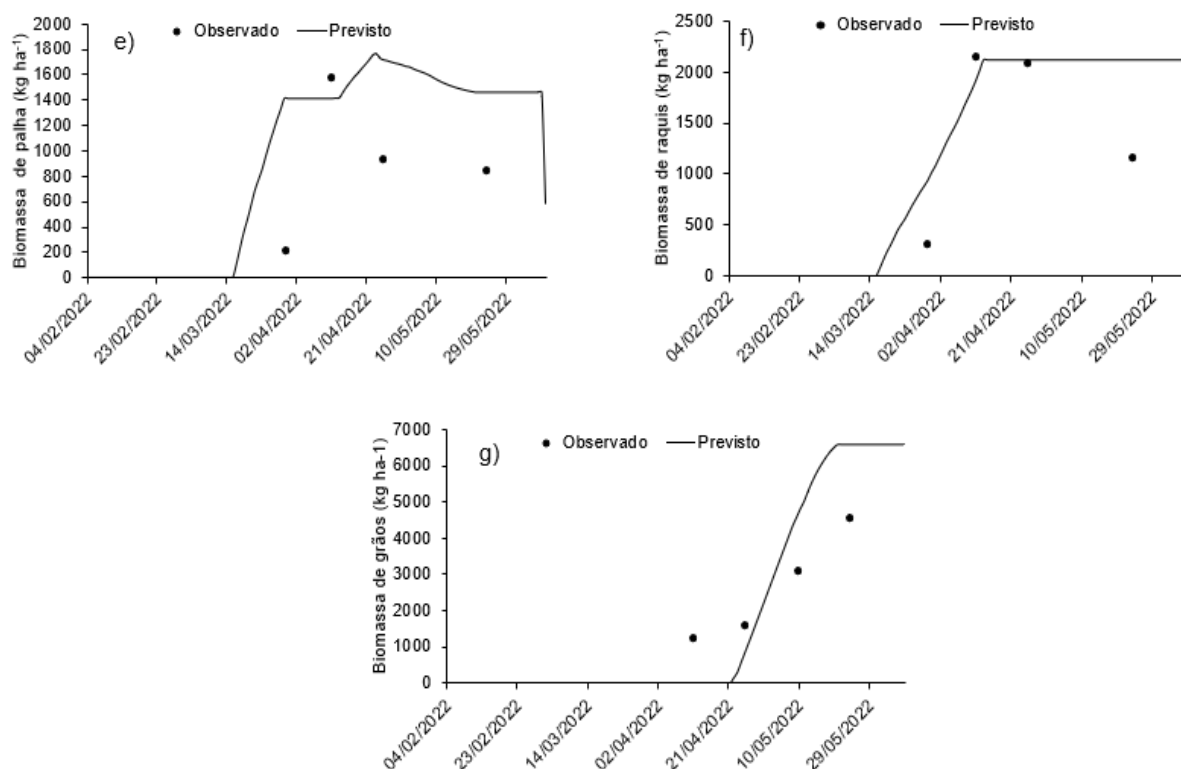


Figura 33 Variação de massa de grãos, palha e ráquis, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os resultados analíticos e métricos das previsões, em comparação com as observações de Biomassa seca total de material vivo acima do solo (Bst , kg ha⁻¹), Biomassa seca de colmo vivo (Bsc , kg ha⁻¹), Biomassa seca de folha viva (Bsf , kg ha⁻¹), Índice de área foliar (IAF), estão apresentados na (Figura 34a, b, c, d).

O modelo simulou os dados previstos da Bst com boa precisão $R^2=0,72$ e boa acurácia com $NSE=0,61$ (Figura 34a). A Bsc foi simulada com boa precisão $R^2=0,90$; no entanto, com imprecisa exatidão $NSE=-2,95$ (Figura 34b). A Bsf e o IAF foram simulados pelo modelo com imprecisão e inexacta eficiência, com $R^2=0,33$ e $0,11$ e $NSE=-0,30$ e $-0,37$, respectivamente (Figura 34c, d). Os valores de NSE , associados a todas as variáveis obtidas com valores negativos, sugerem que a média dos valores observados para o presente trabalho é melhor preditor do que o modelo para todas as variáveis em questão (Gaydon, et al., 2017). As métricas das variáveis analisadas de

Bst e Bsc, com (ME=1306,50 kg ha⁻¹, MAE=2646,50 kg ha⁻¹, RMSE=2920,70 kg ha⁻¹ e NRMSE=36,56%) e (ME=2029,30 kg ha⁻¹, MAE=2029,30 kg ha⁻¹, RMSE=2768,60 kg ha⁻¹ e NRMSE=61,94%) (Figura 34a e b), sustentam-se na forte correlação apresentada entre os dados simulados e observados, ainda que os erros normalizados sejam elevados (Moriassi et al., 2007). Os valores das métricas obtidos para Bsf, com valores de (ME=58,00 kg ha⁻¹, MAE=542,30 kg ha⁻¹, RMSE=602,20 kg ha⁻¹, NRMSE=51,29%) e IAF com (ME=0,19, MAE=0,96, RMSE=1,13, NRMSE=57,12%), são considerados inconsistentes para alguns indicadores, comparados com os resultados obtidos em outras pesquisas realizadas para cultura do milho (Dilla et al. 2018; Morel et al., 2020; Santos, 2020) (Figura 34c, d). Morel et al. (2020), ainda que tenham considerado a previsão de biomassa viva acima do solo aceitável com R²=0,87, consideraram a precisão baixa, com RMSE=5.200 kg ha⁻¹ e NRMSE= 0,41, em comparação com as observações das variáveis em questão. Por outro lado, Santos (2020) relatou que o modelo APSIM-Milho previu o IAF com RMSE variando entre 0,14 e 1,06 cm² cm⁻², porém a produção de biomassa foi simulada com RMSE entre 2.300 e 3.340 kg ha⁻¹, em escala de valores próximos dos resultados obtidos na presente pesquisa. Dessa forma, a inconsistência entre os dados simulados e observados, podem estar relacionados com erros sistemáticos nas observações realizadas ao longo do ciclo de coleta de dados, durante o desenvolvimento fenológico da cultura, o que não invalida as simulações.

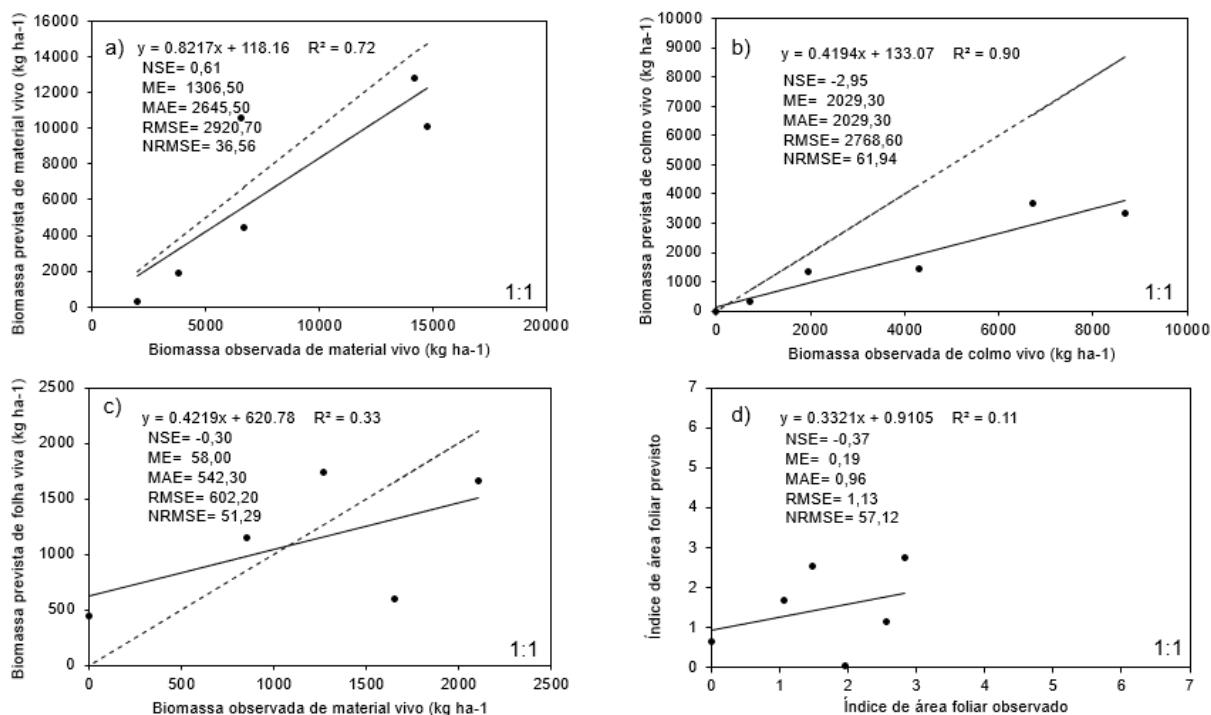


Figura 34 Relações entre a massa viva de milho e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

Os resultados analíticos e métricos dos valores previstos e estimados de Biomassa seca de grãos (Bsg, kg ha⁻¹); Biomassa seca de palha (Bsp, kg ha⁻¹); e Biomassa seca de ráquis (Bsr, kg ha⁻¹) estão apresentados nas (Figuras 35e, f, g). O Modelo APSIM simulou com precisão e exatidão a Bsg, com $R^2=0,98$ e $NSE=0,72$ (Figura 35e). Contudo, simulou a Bsp com imprecisão, $R^2=0,0015$, e inexatidão com $NSE=-42,55$ (Figura 35f). No entanto, simulou com satisfatória precisão a Bsr com $R^2=0,63$, porém com inexatidão de $NSE=-37,55$ (Figura 35g). A forte correlação sustenta as métricas de Bsg com $ME=-372,50$ kg ha⁻¹; $MAE=1364,70$ kg ha⁻¹; e $RMSE=1434,20$ kg ha⁻¹. As métricas de Bsp com $ME=-350,60$ kg ha⁻¹; $MAE=461,80$ kg ha⁻¹; e $RMSE=1583,30$ kg ha⁻¹ não obtiveram sustentação pela fraca correlação $R^2=0,0015$, nem tampouco pela eficiência $NSE=-42,55$. Por outro lado, a Bsr com $ME=-609,30$ kg ha⁻¹; $MAE=693,20$ kg ha⁻¹; e $RMSE=785,00$ kg ha⁻¹ obteve uma razoável correlação, sustentando as métricas dessa variável; entretanto, com inexatidão pelo coeficiente de eficiência $NSE=-37,55$, indicando que a média dos valores é o melhor preditor de dados simulados com relação às observações

(Gayadon et al., 2020). O erro absoluto normalizado, entre o valor simulado e o valor observado, foi considerado ruim, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), para as partições Bsr, Bsp e Bsg com (NRMSE), variando entre 54,70 e 65,87% (Figura 35e, f, g).

A inconsistência da simulação de dados de algumas variáveis na etapa de parametrização pode encontrar explicação na mudança de ambiente, manejo e genótipos adotados na calibração. Nessa perspectiva, Yang e Lei (2024) defendem que a integração de dados observados seja adotada para que os modelos de culturas possam diminuir as incertezas e melhorar a precisão das simulações. Esses mesmos autores afirmaram que uma nova estrutura de assimilação de evapotranspiração (ET) com um conjunto de dados paralelo foi eficaz na simulação de variáveis importantes, com relação ao crescimento das culturas, tais como IAF e rendimento das culturas e ao consumo de água como a ET, obtidos em escalas diárias e sazonais. Nesse viés, as simulações para calibração e validação do APSIM carecem de novas investigações para melhor compreensão das simulações com mudanças de ambiente e genótipos, a fim de atestar a capacidade de capturar o desenvolvimento das culturas em cultivo solteiro e consorciado.

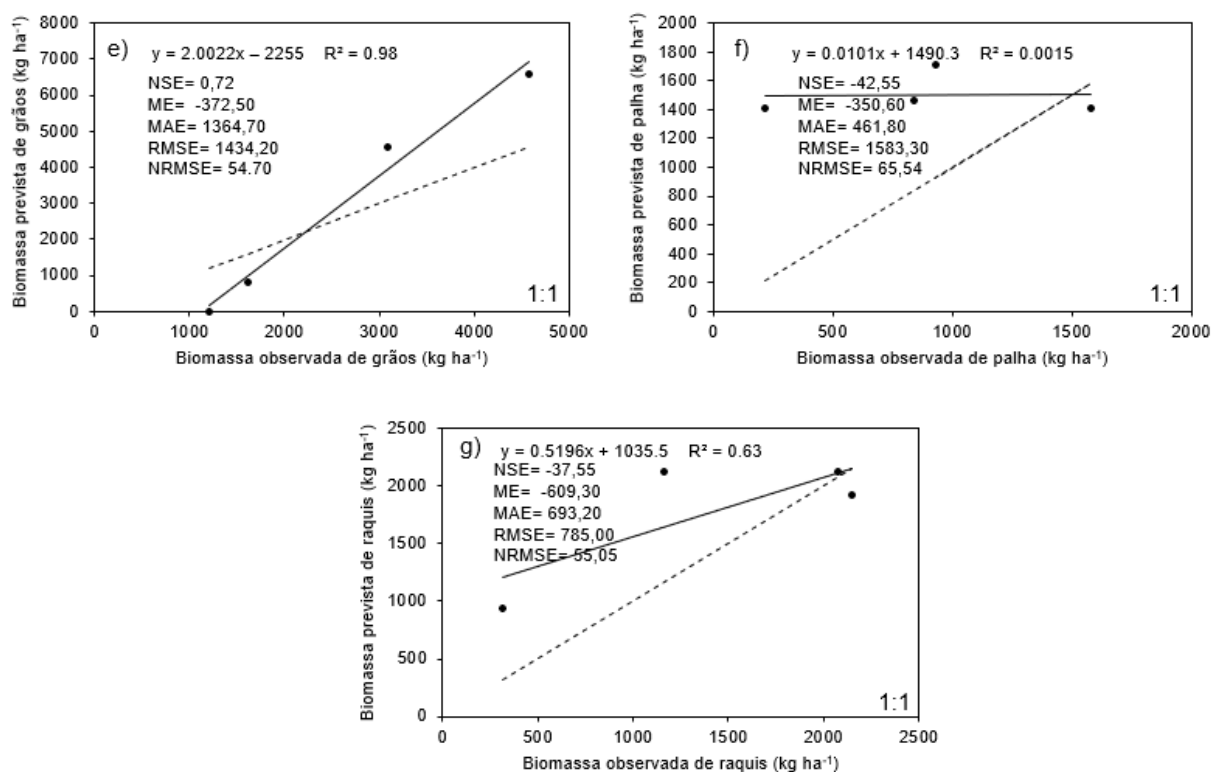


Figura 35 Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

5.2.4 Milho consorciado com a braquiária Marandu

Os dados de radiação e água disponível no solo, camada (0 a 0,9 m), ambos em escala diária, observados e previstos para cultivo do milho em sistema consorciado com capim braquiária Marandu são apresentados, respectivamente, nas Figuras 36a, b.

Os valores acumulados máximos e mínimos de radiação solar global observados e previstos, durante o ciclo reprodutivo da cultura, ficaram em torno de 4,93 e 0,09 MJ m⁻² e 5,80 e 0,01 MJ m⁻², respectivamente. O modelo capturou os dados previstos de radiação em comparação com os dados observados, seguindo o mesmo padrão das observações, sugerindo que o modelo APSIM é capaz de simular a radiação interceptada pelo dossel da planta em sistema consorciado para as condições ambientais e manejo impostos ao sistema de cultivo (Figura 36a).

Os valores em escala diária máximos e mínimos de água disponível no solo, observados entre a germinação e a colheita, ficaram em torno de 165,30 e 147,51

mm, equivalentes a 1,83 e 1,63 mm cm⁻¹, respectivamente, enquanto que os valores máximos e mínimos de água disponível no solo previstos pelo modelo APSIM ficaram em torno de 164,62 e 142,45 mm, equivalentes a 1,82 e 1,58 mm cm⁻¹, respectivamente, sugerindo que o modelo é capaz de capturar a simulação de água disponível no solo na camada de (0 a 0,9m), de forma satisfatória, em sistema de cultivo consorciado em sequeiro (Figura 36b).

A água disponível no solo no sistema consorciado em sequeiro, em comparação com a água disponível camada (0,0 a 0,9 m) do cultivo solteiro, apresentou o mesmo comportamento e satisfatória simulação. Vale ressaltar que a competição por água no sistema consorciado milho-braquiária foi moderada, tendo em vista que houve aplicação de herbicida para travar o crescimento da braquiária, diminuindo assim a evapotranspiração no sistema. Em geral, as simulações de água no solo, em sistemas de cultivo em sequeiro, fornecem simulações mais ajustadas quando comparadas aos sistemas irrigados em função das maiores amplitudes entre os valores máximo e mínimo em sistemas de sequeiro. Os relatos de Souza et al. (2022) sugeriram que a simulação de água no solo com o modelo APSIM em sistema irrigado fornece pouca precisão em relação às observações, sugerindo que a baixa amplitude de água no solo, possivelmente, seja a causa da inconformidade das simulações em sistemas irrigados.

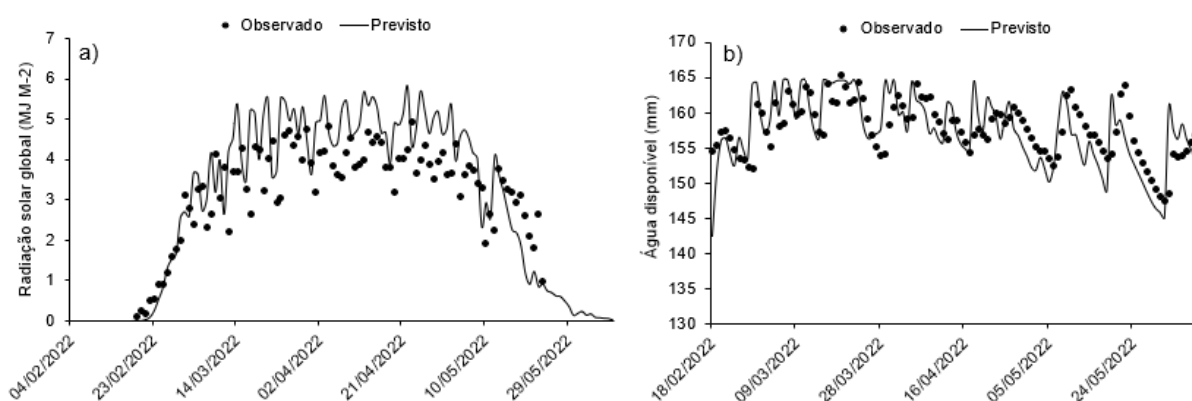


Figura 36 Variação da radiação solar global e de água disponível no perfil do solo (0,0 a 0,9 m), observada e prevista, utilizada na parametrização do milho, cultivado em sistema solteiro sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os parâmetros fenológicos utilizados na parametrização do modelo de milho consorciado com capim braquiária Marandu e os respectivos graus dias (GDA) foram similares aos parâmetros fenológicos utilizados na parametrização do modelo de

milho solteiro, descritos na Tabela 20. Com isso, a demanda de tempo térmico (GDA) foi similar para as fases Juvenil e enchimentos de grãos para o milho consorciado com braquiária Marandu, quando comparado ao milho solteiro (Tabela 20). Dessa forma, sugere-se que o consórcio com o capim braquiária Marandu não afeta a exigência térmica do milho. A disponibilidade térmica influenciou de forma direta o desenvolvimento fenológico das plantas de milho, mediando as mudanças de fases durante o ciclo de desenvolvimento da cultura da fase Juvenil à Maturação fisiológica, o que já era esperado, conforme Wagner et al. (2011).

As mudanças nos valores das variáveis dos parâmetros do submodelo folha, caule e raiz, realizadas na parametrização do modelo de milho consorciado com o capim braquiária Marandu, foram similares às mudanças ocorridas na parametrização do milho em sistema de cultivo solteiro, ou seja, as variáveis e seus respectivos fatores do milho consorciado ajustados mantiveram o valor, quando comparados com o milho solteiro, respectivamente (Tabelas 20 e 21). Contudo, o parâmetro, fator de competição da folha, foi acrescentado no submodelo foliar do milho consorciado, com o fator “y” variando de 1 a 0,3 (Tabela 21).

Tabela 21 Parâmetros do submodelo foliar, caule e raiz, parametrizados para o milho, cultivado em sistema de cultivo consorciado sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido Status 3845
Submodelo foliar			
Duração do crescimento da folha	x:nº. de nós	x: 0; 0,3; 0,5; 1	x: 0; 0,3; 0,5; 1
	y:(GD)	y: 0,5; 100; 125; 50	y: 2,0; 500; 600; 300
Duração do atraso da folha	x:nº. de nós	x: 0; 0,5; 0,7; 0,8; 1	x: 0; 0,5; 0,7; 0,8; 1
	y:(GD)	y: 300; 300; 700; 900; 1300	y: 250; 250; 450; 550; 750
Duração da Senescência da folha	x:nó aparente	x: 0; 0,3; 0,5	x: 0; 0,3; 0,5
	y:(GD)	y:500; 500; 700	y:150; 150; 350
Área foliar específica máxima	x:folha aparente	x: 1; 9	x: 1; 6; 13; 20
	y:AFE (mm ² g ⁻¹)	y: 30000; 20000	y: 10000; 30000; 15000; 15000
Área foliar específica mínima	x:folha aparente	x: 1; 9	x: 1; 9
	y: AFE (mm ² g ⁻¹)	y: 25000; 15000	y: 20000; 15000
Coefficiente de extinção de luz (k)	adimensional	3,0	4,5
Fator fenológico da folha	x:estágio	-	x: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 5,03; 5,04; 5,02; 5,3; 6; 7; 8; 9;10
	y:fator	-	y:500; 500; 500; 200; 100; 50; 50; 50; 50; 50; 10; 5; 1; 1
Fator de competição	x:g m ⁻²	-	x: 0; 300; 500; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000
	y:fator	-	y: 1; 0,1; 0,7; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3; 0,3
Submodelo de caule			
Taxa de senescência do caule	x: estágio	x:0,0	x:0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 10,999; 11
	y: fração (0-1) dia ⁻¹	y:0,0	y: 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 1
Fração de partição de caule	x: estágio	x: 3; 5; 6; 7; 7,001	x: 3; 5; 6; 7; 7,001
	y: g m ⁻²	y: 0,1; 1; 0,4; 0; 0	y: 0,5; 0,5; 1,0; 1,0; 0,0
Submodelo de raiz			
Fator de aeração	x: espaço de poros (0-1)	-	x: 0,0; 0,03; 1
	y: fator (mm dia ⁻¹)	-	y: 1,0; 1,0; 1,0
Fator de estresse de profundidade de raiz	0-1	-	1,0
DM de nutrientes (fração de partição)	x: (estágios)	0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0	0,0; 2,99; 3,0; 6,0; 7,0
	y: g m ⁻¹)	0,0; 0,0; 0,1; 0,1; 0,0	0,0; 0,0; 0,5; 0,5; 0,0

Os parâmetros do submodelo palha e ráquis do milho consórcio foram similares aos parâmetros do milho solteiro, respectivamente (Tabelas 21 e 22). O submodelo grãos do milho consorciado e do milho solteiro não sofreram alteração nos parâmetros, permanecendo igual com os valores genuínos do submodelo grãos do APSIM-milho.

Tabela 22 Parâmetros do submodelo de palha e ráquis, parametrizados para o milho produzido em sistema de cultivo consorciado sob regime sequeiro, avaliado entre fevereiro e junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Parâmetros com vários valores representam uma faixa de valores para uma determinada variável (x) e seus correspondentes valores do fator (y)

Parâmetros	Unidade	Valor APSIM	Híbrido Status 3845
Submodelo de palha			
Estágio inicial da palha	fase	5,70	5,08
Duração do crescimento da palha	(GDA)	330,0	300,0
Peso máximo da palha	g	30,0	60,0
Submodelo de ráquis			
Estágio Inicial da ráquis	fase	5,80	5,08
Duração do crescimento da ráquis	tempo (GDA)	900,0	600,0
Peso Máximo da ráquis	g	23,0	40,0

O modelo simulou a variável Bst de forma satisfatória em escala diária, capturando os efeitos de ambiente e de manejo impostos ao sistema, com superestimação no final do ciclo da cultura (Figura 37a). O modelo também simulou de forma satisfatória a evolução do crescimento da Bsc, porém, no final do ciclo, o modelo capturou uma mortalidade de colmo antecipada com relação aos dados observados (Figura 37b). Com relação à Bsf e IAF, o modelo simulou de forma insatisfatória o desenvolvimento, evidenciando que o modelo não foi capaz de capturar os efeitos de manejo e ambiente, subestimando a Bsf e o IAF até a metade do ciclo de desenvolvimento do milho consorciado com braquiária Marandu, respectivamente (Figuras 37c, d).

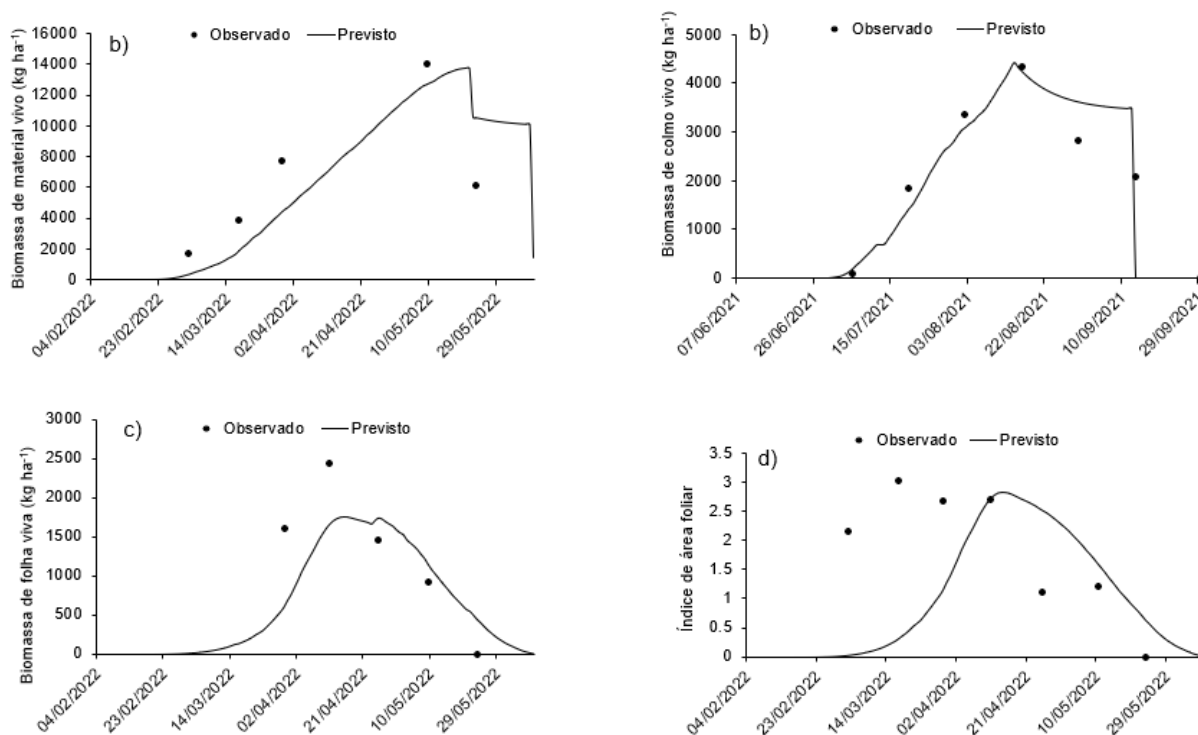


Figura 37 Variação de massa viva e o índice de área foliar, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

São apresentados nas Figuras (38e, f, g) a Biomassa seca de grãos, Biomassa seca de palha Bsr e Biomassa seca de ráquis Bsg. O modelo capturou os efeitos de manejo e ambiente, expressando o desenvolvimento de grãos, de forma satisfatória (Figura 38g), apresentando bom ajuste dos dados previstos do desenvolvimento em escala diária, comparados aos dados observados, no entanto, com superestimativa no final do ciclo de desenvolvimento. Contudo, o modelo capturou de forma insatisfatória os efeitos de ambiente para os componentes de rendimento Bsp e Bsr, com superestimação, praticamente ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento (Figuras 38e, f).

O rendimento de grãos do milho cultivado em sistema consorciado, capturado pelo modelo no final da maturação fisiológica, ficou em torno de 4.348,50 kg ha⁻¹, e o rendimento observado ficou em torno de 6.539,40 kg ha⁻¹. Ainda que o rendimento simulado e observado tenha uma amplitude considerável, o modelo demonstrou capacidade de simular o rendimento de grãos nas condições de manejo e de ambiente impostas ao cultivar, sustentado pela forte correlação e boa eficiência do modelo na

simulação, além da capacidade de o modelo simular o desenvolvimento de grãos seguindo os mesmos padrões de desenvolvimento das observações (Figura 38e).

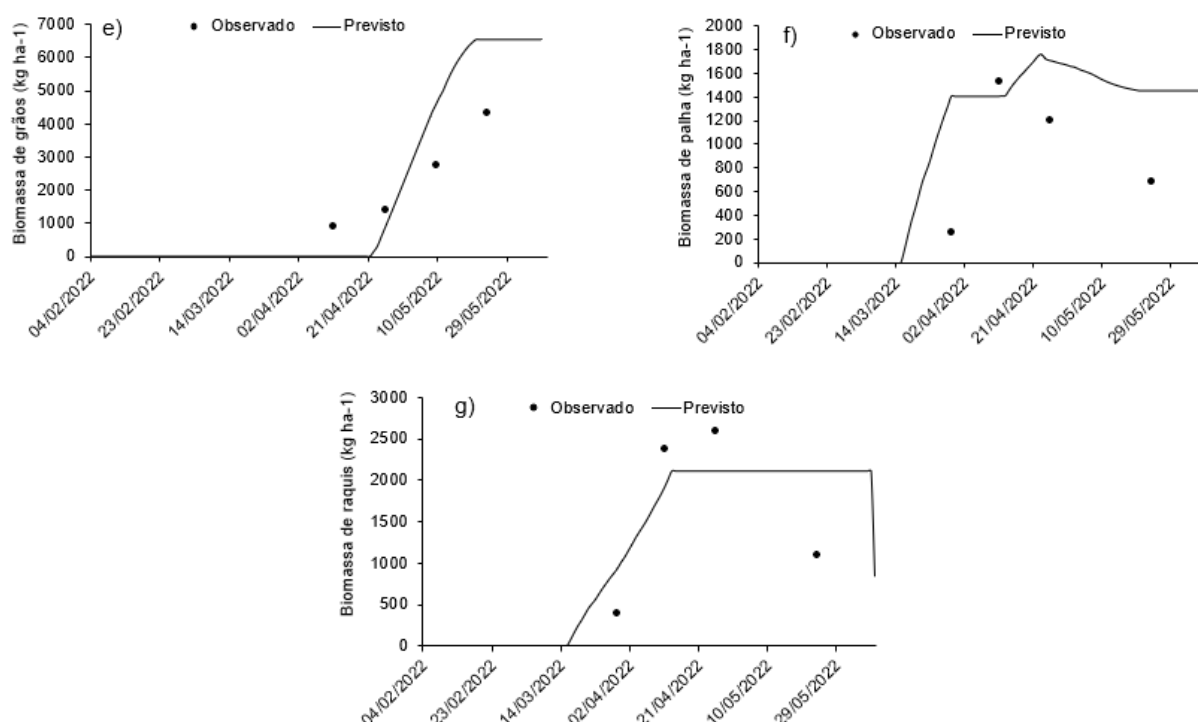


Figura 38 Variação de massa de grãos, palha e ráquis, observada e prevista para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil

Os resultados analíticos e métricos dos valores previstos e estimados de Biomassa seca total de material vivo acima do solo (Bst, kg ha⁻¹); Biomassa seca de colmo vivo (Bsc, kg ha⁻¹); Biomassa seca de folha viva (Bsf, kg ha⁻¹); e Índice de área foliar (IAF) estão apresentados nas Figuras (39a, b, c, d).

O modelo capturou as simulações do milho consorciado com forte similaridade com as simulações do milho solteiro. O modelo simulou os dados previstos da (Bst) com boa precisão $R^2=0,70$ e boa acurácia com $NSE=0,68$ (Figura 39a). A Bsc foi simulada com boa precisão $R^2=0,87$, no entanto, com imprecisa exatidão $NSE=-4,34$, (Figura 39b). A Bsf foi simulada de forma imprecisa e inexata eficiência com $R^2=0,44$ e $NSE=-0,43$, respectivamente (Figura 39c). O IAF também foi simulado com imprecisão e inexatidão, com ($R^2=0,0025$) e ($NSE=-1,30$), respectivamente, (Figura 39d), conforme Moriasi et al. (2007).

Este estudo também avaliou as métricas das variáveis (Bst) com ($ME=723,90$ kg ha⁻¹, $MAE=2489,70$ kg ha⁻¹, $RMSE=2764,70$ kg ha⁻¹ e $NRMSE=41,26\%$); Bsc com

(ME=2373,20 kg ha⁻¹, MAE=2373,20 kg ha⁻¹ e NRMSE=79,42%), sustentadas pela boa correlação entre as previsões e as observações (Figura 39a, b). Contudo, as métricas de Bsf com (ME=170,20 kg ha⁻¹, MAE=551,70 kg ha⁻¹, RMSE=629,50 kg ha⁻¹ e NRMSE=48,99%) e o IAF com (ME=-0,55, MAE=1,27, RMSE=1,55 e NRMSE=84,24%) ainda que não tenham fornecido boa correlação entre os valores são considerados razoáveis (Figura 39c, d). Observa-se que a insatisfatória simulação da variável (IAF), obtida nesta pesquisa para o milho consorciado, está similar aos dados fornecidos na simulação do milho solteiro, o que vai ao encontro dos relatos de imprecisão na determinação da mesma variável em pesquisa de Santos (2015), Morel et al. (2020) e Chisanga, et al. (2021). Contudo, vale ressaltar que a determinação do IAF sofre interferência de uma grande variabilidade de fatores, aumentando a incerteza das observações e previsões, interferindo de forma direta na boa performance do modelo.

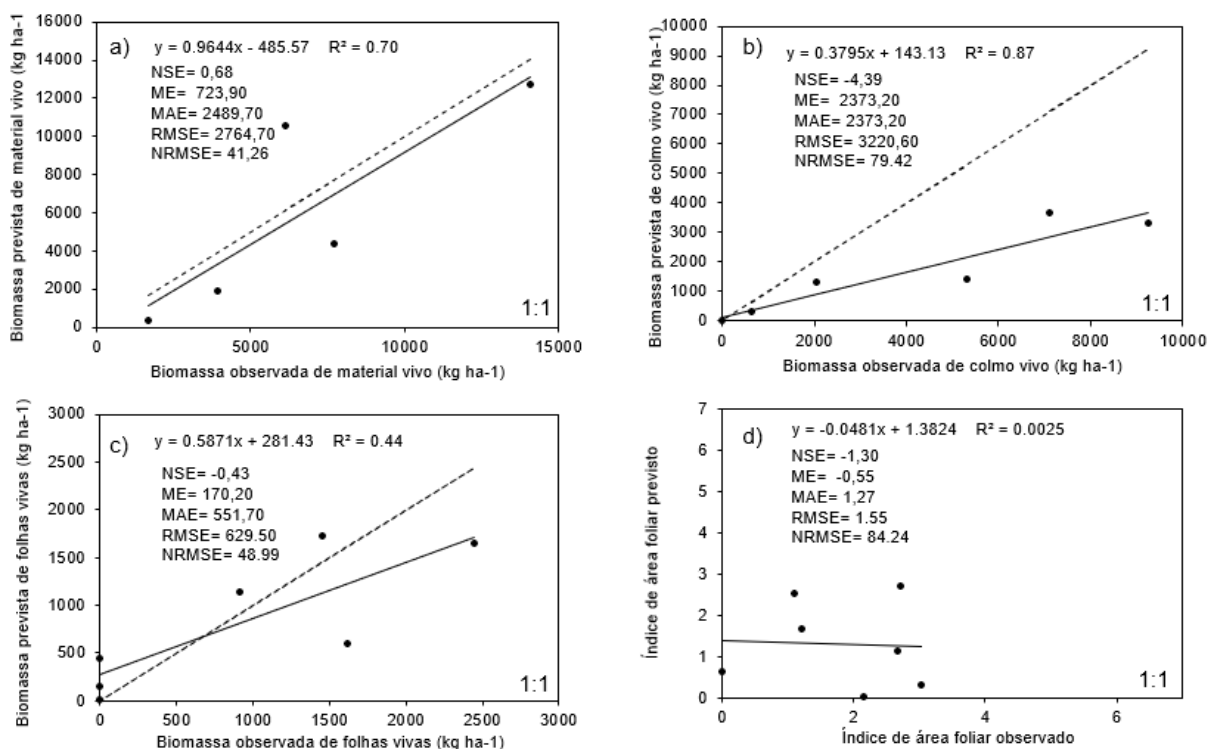


Figura 39 Relações entre a massa viva de milho e o índice de área foliar, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo, Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

Os resultados analíticos e métricos dos valores previstos e estimados de Biomassa seca de grãos (Bsg, kg ha⁻¹); Biomassa seca de ráquis (Bsr, kg ha⁻¹); e Biomassa seca de palha (Bsp, kg ha⁻¹) estão apresentados nas Figuras (40e, f, g). O Modelo APSIM simulou com precisão e exatidão a (Bsg), com $R^2=0,97$ e $NSE=0,67$, (Figura 40e). Contudo, simulou a Bsr e Bsp com imprecisão, com ($R^2=0,27$ e $0,03$) e inexatidão com ($NSE=-2,49$ e $-51,01$), respectivamente (Figura 40f, g). As métricas obtidas para Bsg foram (ME=-610,40 kg ha⁻¹, MAE=1387,90 kg ha⁻¹, RMSE=1527,10 kg ha⁻¹); Bsr com (ME=-396,00 kg ha⁻¹, MAE=776,40 kg ha⁻¹, RMSE=856,20 kg ha⁻¹); e Bsp com (ME=-688,50 kg ha⁻¹, MAE=739,60 kg ha⁻¹, RMSE=837,80 kg ha⁻¹). O erro absoluto normalizado entre o valor simulado e o valor observado foi considerado ruim, conforme Jamieson et al. (1991) e Heinemann et al. (2012), para as partições Bsg, Bsr e Bsp, com NRMSE variando entre 59,70 e 102,21% (Figura 40e, f e g).

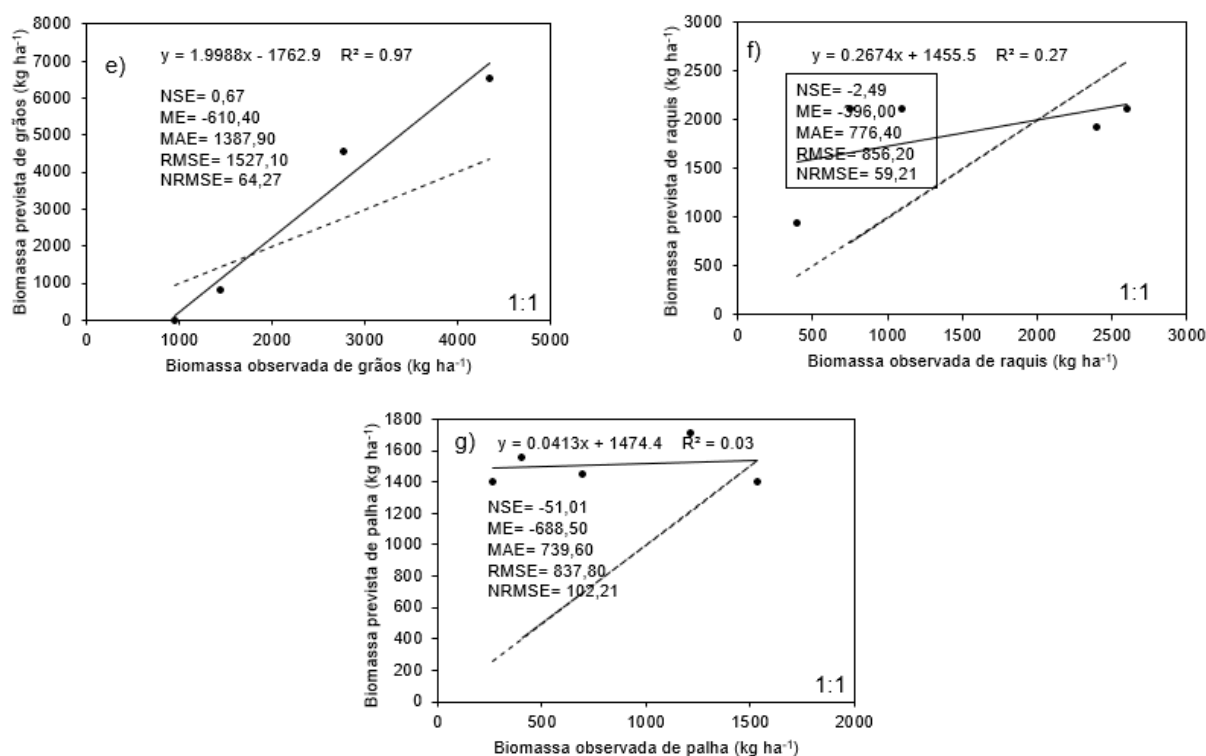


Figura 40 Relações entre a massa de grãos, palha e ráquis, observadas e previstas para o experimento utilizado na parametrização do milho, cultivado em sistema consorciado sob regime sequeiro, em ensaio experimental realizado no período de fevereiro a junho de 2022, Brejo-Maranhão, Brasil. Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE, %), Erro médio (ME, kg ha⁻¹), Erro absoluto médio (MAE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE, kg ha⁻¹), Raiz Quadrada do Erro Médio Normalizado (NRMSE, %)

6 CONCLUSÕES

O modelo APSIM apresenta ajustes satisfatórios nas simulações do crescimento da braquiária Ruziziensis em cultivo solteiro e consorciado e, na estimativa da braquiária Marandu, apenas em cultivo solteiro.

O modelo APSIM apresenta ajustes satisfatórios nas simulações do crescimento do milho em cultivo solteiro e consorciado nos dois ambientes.

O modelo APSIM simula satisfatoriamente o crescimento e o rendimento da braquiária Ruziziensis, tanto em cultivo solteiro como consorciado com o milho, e da braquiária Marandu apenas em cultivo solteiro.

O modelo APSIM simula satisfatoriamente o crescimento e desenvolvimento do milho em cultivo solteiro e consorciado com a braquiária Ruziziensis e com a Marandu.

O modelo APSIM-Milho é capaz de simular o acúmulo de biomassa viva total acima do solo e o rendimento de grãos ao longo do ciclo de desenvolvimento, no processo de parametrização do milho solteiro e consorciado, sob irrigação e sequeiro.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR NETTO, A. O.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S.Z. Análise de crescimento na cultura da batata submetida a diferentes lâminas de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.5, p.901-907, 2000.
- ALLEN, R. G. Crop Evapotranspiration-Guideline for computing crop water requirements. **Irrigation and drain**, v. 56, p. 300, 1998.
- ALMEIDA, A. C. S et al. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, n.3, p. 1448-1457, 2017.
- ALMEIDA, R. E. M. de. et al. Destino do fertilizante nitrogenado no consórcio de milho com braquiária. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Pesca e Aquicultura**, v. 1, 35p, Palmas -TO, 2019. ISSN 2318-1400
- ALVES, V. B.; CECCON, G.; LEITE, L. F. Morfologia e produtividade de híbridos de milho Safrinha solteiro e consorciado com braquiária. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 2, p. 152-163, 2013.
- AMARAL, T. et. al. **Resposta de cultivares de milho ao estresse hídrico**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 27p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 207), 2016.
- ANDRADE JUNIOR, A. S. D. et al. Water status evaluation of maize cultivars using aerial images. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 2, p. 432 – 442, 2021.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de et al. Atlas climatológico do Estado do Piauí. **Embrapa Meio-Norte-Documentos (INFOTECA-E)**, 2004.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de. et al. Índice de satisfação da necessidade de água do consórcio milho-braquiária. **Agrometeoros**, v. 25, n. 1, 2018.
- ANDRADE, A. S. de. 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.
- ANTONIAZZI, N.; DESCHAMPS, C. Análise de crescimento de duas cultivares de cevada após tratamentos com elicitores e fungicidas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1065-1071, 2006.
- ARAÚJO, S. A. do C. et al. Características fotossintéticas de genótipos de capim-elefante anão (*Pennisetum purpureum* Schum.) em estresse hídrico. **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v.32, n.1, p.1-7, 2010.
- AVRAMOVA, V. et al. Drought induces distinct growth response, protection and recovery mechanisms in the maize leaf growth zone. **Plant Physiology**, Rockville, v. 169, n.2, p. 1382-1396, 2015.

AZEVEDO, D. M. P. de. et al. Rendimento de biomassa em consórcio de milho e forrageiras tropicais. **Comunicado Técnico 256, Embrapa Meio Norte**, Teresina, PI, 2020.

BALCÃO, L. F. **Parametrização do APSIM-Tropical Pasture para produção de biomassa, competição por luz e água em sistema silvipastoril com B. brizantha cv. Piatã e. urograndis**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) –. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. **Boletim agrometeorológico do ano de 2018 para o Município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. 34p. (Embrapa Meio-Norte, Documentos, 266).

BAUM, M. E. et al. Evaluating and improving APSIM's capacity in simulating long-term corn yield response to nitrogen in continuous-and rotated-corn systems. **Agricultural Systems**, v. 207, p. 103629, 2023.

BENICASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. 2. ed. Jaboticabal: Funep, 42p, 1988.

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.2, p.243-249, 2006.

BERGAMASCHI, H. et al. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, v. 84, p. 85, 2014.

BERGHUIJS, H. N. et al. Calibrating and testing APSIM for wheat-faba bean pure cultures and intercrops across Europe. **Field Crops Research**, v. 264, p. 1-14, 2021.

BOSI, C. et al. APSIM-Tropical Pasture: a model for simulating perennial tropical grass growth and its parameterisation for palisade grass (*Brachiaria brizantha*). **Agricultural Systems**, v. 184, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102917>. Acesso em: 19 de junho de 2023.

BOSI, C. et al. Produtividade e características biométricas do capim-braquiária em sistema silvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 449-456, 2014.

BOSI, C. **Parameterization and evaluation of mechanistic crop models for estimating *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã productivity under full sun and in silvipastoral system**, 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de sistemas agrícolas) –. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

Brachiaria ruziziensis. **Planta Daninha**, v. 28, p. 359-364, 2010.

BRAGA, G. J. et al. Eficiência de pastejo de capim marandu submetido a diferentes ofertas de forragem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1641-1649, 2007.

BRITO, M. E. B. et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013.

BRITO, M. E. B. et al. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 5, 2013.

BUSO, W. H. D. et al. Desempenho agrônômico de híbridos de milho em três épocas de semeadura no cerrado goiano. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 4, p. 46-52, 2017.

CARDOSO, M. J. et. al. Rendimentos de grãos de híbridos comerciais de milho, safra 2020/2021, em ambientes do Meio-Norte brasileiro. **Embrapa Meio-Norte**, Teresina, 2023. (Comunicado Técnico 267).

CARRILHO, P.H.M. et al. Vegetative and reproductive behavior of *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk under different shade levels. **Cuban Journal of Agricultural Science**, v.46, p.85-90, 2012.

CARVALHO, M. W. L. et al. Morfofisiologia do milho irrigado com e sem déficit hídrico sob diferentes arranjos de plantas na região meio-norte do Piauí. **Revista Cultura Agrônômica**, v. 31, n. 1, p. 41, 2022.

CARVALHO, M. W. L. et al. Productive performance of maize crop irrigated with and without water deficit in different plant arrangements. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 19, p. 13-13, 2020.

CASTRO, M. V. L. et al. Rendimento industrial e composição química de milho de alta qualidade proteica em relação a híbridos comerciais. **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.39, p.233-242, 2009.

CECCON, G. Cálculo para taxa de semeadura de espécies forrageiras perenes em cultivos anuais. **Agrarian**, v. 8, n. 27, p. 39-46, 2015.

CECCON, G. et al. Consórcio milho-braquiária com densidades populacionais da forrageira no centro-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 1, p. 157-167, 2018.

CECCON, G. et al. Uso de herbicidas no consórcio de milho safrinha com *brachiaria Ruziziensis*. **Planta Daninha**, v. 28, p. 359-364, 2010.

CESCONETTO, L. F. et al. Aspectos técnicos de manejo utilizados no Sul Catarinense na cultura do milho. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.34, n.2, p.73-77, 2021.

CHISANGA, C. B.; PHIRI, E.; CHINENE, V. R. Evaluating APSIM-and-DSSAT-CERES-Maize models under rainfed conditions using zambian rainfed maize cultivars. **Nitrogen**, v. 2, n. 4, p. 392-414, 2021.

COELHO, A. E. et al. Biomass and protein in ruzigrass intercropped with maize subjected to plant densities and nitrogen fertilization. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, p. e03296, 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 8, safra 2021/22, n. 4 quarto levantamento, janeiro. 2022. Disponível em: Acesso em: 25 de janeiro de 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: safra 2019/2020 - n. 5 quinto levantamento: fevereiro. 2020. **Companhia Nacional de Abastecimento**, Brasília, v. 7, n. 5, p. 1-112, 2020. Disponível em: Acesso em: 17 de fevereiro de 2022.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. **Boletim da safra de grãos: Segundo levantamento**, novembro 2023-safra 2023/2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 17 nov. de 2023.

Consórcio com forrageiras em diferentes épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada-RBAI**, v. 11, n. 7, 2017.

CONTINI, Elisio et al. Milho: caracterização e desafios tecnológicos. Brasília: **Embrapa. Desafios do Agronegócio Brasileiro**, 2, 2019.

COSTA, J. P. N. et al. Evapotranspiração e rendimento do milho a diferentes lâminas e salinidade da água de irrigação. **Irriga**, v.1, n.2, p.74-80, 2015.

COSTA, N. R. et al. Adubação nitrogenada no consórcio de milho com duas espécies de braquiária em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 8, p. 1038-1047, 2012.

CRUZ, J. C. et al. **Manejo da cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa 2006.

DANTAS JÚNIOR, E. E; CHAVES, L. G.; FERNANDES, J. D. Lâminas de irrigação localizada e adubação potássica na produção de milho verde, em condições semiáridas. **Revista Espacios**, v. 37, n. 27, 2016.

DELLA NAVE, F. et al. Calibrating APSIM for forage sorghum using remote sensing and field data under sub-optimal growth conditions. **Agricultural Systems**, v. 201, p. 103459, 2022.

DILLA, A. et al. Potential of the APSIM model to simulate impacts of shading on maize productivity. **Agroforestry Systems**, v. 92, p. 1699-1709, 2018.

DONG, M. et al. Effects of Changing Climate Extremes on Maize Grain Yield in Northeast China. *Agronomy*, v. 13, n. 4, p. 1050, 2023.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DUARTE, Y. C. N. **Modelos de simulação da cultura do milho-uso na determinação das quebras de produtividade (Yield Gaps) e na previsão de safra da cultura no Brasil**. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

DUARTE, Y. C.; SENTELHAS; P. C. Intercomparison and performance of maize crop models and their ensemble for yield simulations in Brazil. **International Journal of Plant Production**, v. 14, p. 127-139, 2020.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária-Embrapa Agropecuária Oeste: **Consórcio milho-braquiária** / editor técnico Gessí Ceccon. Brasília, DF. 2013.

FANCELLIO, A. L. Ecofisiologia, fenologia e implicações básicas de manejo. In: GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. **Milho: do plantio à colheita**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, p. 49-75, 2017.

FEITOSA, T. S. **Parametrização do modelo APSIM-Tropical Pasture para a simulação de crescimento de Megathyrus maximus cv. Mombaça**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) –. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

FELEKE, H. G.; SAVAGE, M. J.; TESFAYE, K. Calibration and validation of APSIM–Maize, DSSAT CERES–Maize and AquaCrop models for Ethiopian tropical environments. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 38, n. 1, p. 36-51, 2021.

FIETZ, C. R. et al. Demanda hídrica e coeficientes de cultivo de milho safrinha consorciado com braquiária. **Agrometeoros**, v. 27, n. 2, 2020.

FORNASIERI FILHO, Domingos. **Manual da cultura do milho**. p. 125-128, Funep, 2007.

FUMIS, T. F.; PEDRAS, J. F.; SAMPAIO, A. C. Análise de crescimento em cultivares de trigos (*Triticum aestivum* L.) submetidos a déficits hídricos, na região de Bauru-SP. **Irriga**, v. 2, n. 3, p. 101-114, 1997.

GARCIA, A. et al. Análise de crescimento de uma cultura de milho submetida a diferentes regimes hídricos. **Revista Nucleus**, v. 5. n. 1, p. 239-251, 2008.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. Defoliation, shoot plasticity, sward structure and herbage utilization in pasture: Review of the underlying ecophysiological processes. **Agriculture**, v. 5, n. 4, p. 1146-1171, 2015.

GAYDON, D.S. et al. Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. **Field Crops Research**, v. 204, p. 52-75, 2017.

GITHUI, F. et al. Resource sharing in intercropping models and a case study with APSIM in southern Australia. **European Journal of Agronomy**, v. 142, p. 126680, 2023.

GOBBI, K. F. et al. Massa de forragem e características morfológicas de gramíneas do gênero *Brachiaria* na região do arenito Caiuá/PR. **Boletim de Indústria Animal**, v. 75, 2018.

GOMES, F. J. et al. Parameterization of the APSIM model for simulating palisadegrass growth under continuous stocking in monoculture and in a silvopastoral system. **Agricultural systems**, v. 184, p. 102876, 2020.

GOMES, F. J. **Sistema silvipastoril: respostas agronômicas e adaptação do modelo APSIM para capim-marandu sob lotação contínua**. 2019. Tese (Doutorado em ciência animal e pastagens) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.

GUIMARÃES, P. S.; ROCHA, D. S.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z. Conteúdo de carboidrato foliar em híbridos de milho submetidos à restrição hídrica. **Evidencia**, v. 19, n. 2, p. 93-112, 2019. DOI: 10.18593/eba. v19i1.20201.

GUISCHEM, J. M. et al. Crescimento e Desenvolvimento de Cultivares de Milho (*zea mays* L.) no Plantio de "Safrinha". In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis, SC. **Anais**. Florianópolis, SC, 2002.

HAO, B. et al. Radiation-use efficiency, biomass production, and grain yield in two maize hybrids differing in drought tolerance. **Journal of agronomy and crop science**, v. 202, n. 4, p. 269-280, 2016.

HOLZWORTH, D. et al. APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. **Environmental Modelling & Software**, v. 103, p. 43-51, 2018.

HOLZWORTH, Dean P. et al. APSIM – evolução para uma nova geração de simulação de sistemas agrícolas. **Modelagem Ambiental e Software**, v. 327-350, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Dados históricos**: 2019. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 30 novembro, 2021.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: RiMa, 529 p., 2000.

MAGALHÃES, P. C. et al. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho submetidas a baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Brazilian Journal of Maize and Sorghum**, v. 8, n. 03, 2009.

MANFRON, P. A. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura do milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 333-342, 2003.

MANSOURI-FAR, C. et al. Maize yield response to deficit irrigation during low-sensitive growth stages and nitrogen rate under semi-arid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 1, p. 12-22, 2010.

MARTUSCELLO, J. A. et al. Produção de gramíneas do gênero *Brachiaria* sob níveis de sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 1183-1190, 2009.

MATSE, D. T. et al. Simulating gibberellic acid effect on pasture yield on naturally deposited and fixed area urine. **Environments**, v. 10, n. 7, p. 112, 2023.

MÁXIMO, P. J. M. et al. Adubação nitrogenada em cobertura em dois cultivares de milho no Cariri-CE. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 6, n. 1, p. 23-28, 2019.

MEDEIROS, R. M.; CAVALCANTE, E. P.; DUARTE, J. F. M. Classificação Climática de Köppen para o Estado do Piauí – Brasil. **Revista Equador (UFPI)**, v. 9, n 3, p.82-99, 2020.

MELO, A. V. et al. Desempenho agrônomo de genótipos de milho submetidos ao estresse hídrico no sul do estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.17, n.2, p. 177-189, 2018.

MELO, F. B.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; PESSOA, B. L. O. **Levantamento, zoneamento e mapeamento pedológico detalhado da área experimental da Embrapa Meio-Norte em Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2014. 47 p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-866X; 231).

MELO, F. D. B. et al. **Fertilizações nitrogenada e potássica e produtividades técnica e econômica de milho cultivado no Cerrado da Região Leste Maranhense**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2021. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 130).

MELO, R. F. et al. Desenvolvimento e produtividade do milho BRS Gortutuba sob diferentes lâminas de irrigação e adubação orgânica. **Revista Científica Intelletto**, v.3, n.1, p. 1-14, 2018.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of applied ecology**, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2401901>. Acesso em: 2 out. 2023.

MOREL, J. et al. Challenges for simulating growth and phenology of silage maize in a nordic climate with APSIM. **Agronomy**, v. 10, n. 5, p. 645, 2020.

MOTAZEDIAN, A.; KAZEMEINI, S. A.; BAHRANI, M. J. Sweet corn growth and Grain Yield as influenced by irrigation and wheat residue management. **Agricultural Water Management**, v. 224, p. 105748, 2019.

MÜLLER, A. G. et al. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 65-71, 2005.

NASCIMENTO, F. N. et al. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.2, p. 167-181, 2015.

NUNES, S. G. et al. **Brachiaria brizantha cv. Marandu**. Campo Grande, MS: Embrapa -CNPGC, 1984.

OJEDA, J. J. et al. Modelling stover and grain yields, and subsurface artificial drainage from long-term corn rotations using APSIM. **Agricultural Water Management**, v. 195, p. 154-171, 2018.

OLIVEIRA, O. H. D et al. Azospirillum brasilense in corn grown single and intercropped with *Urochloa* in two contrasting soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, 2022.

OLIVEIRA, S. M. de. Et. al. Closing the nitrogen budget of intercropped maize and palisadegrass. **European Journal of Agronomy**, v. 119, p. 1-9, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126093>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030120301003>). Acesso em: 21 de agosto de 2023.

OLIVEIRA, T. F. et al. Uptake and exportation of micronutrients in high productivity corn fields. **Revista agro@mbiente on-line**, v. 13, p. 55-67, 2019.

PACIULLO, D. S. C. et al. Crescimento de capim-braquiária influenciado pelo grau de sombreamento e pela estação do ano. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 917-923, 2008.

PEDREIRA, B. C.; PEDREIRA, C. G. S. Fotossíntese foliar em capim-Xaraés [*Brachiaria brizantha* (A. Rich.) Stapf. cv. Xaraés] e modelagem do potencial assimilatório do dossel sob estratégias de lotação rotacionada. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 773-779, 2007.

PENG, T. et al. Simulation of the growth potential of sugarcane as an energy crop based on the APSIM model. **Energies**, v. 13, n. 9, p. 2173, 2020.

PEQUENO, D. N. L. 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, 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.

PEREIRA, A.R.; MACHADO, E.C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campinas: Instituto Agrônômico. 33p. (Boletim Técnico, 44), 1987.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 39-49, 2019.

PORTES, T.A.; CASTRO JR., L.G. Análise de crescimento de plantas: um programa computacional auxiliar. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**. Campinas, v.3, n.1, p.53-56, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000700009>. Acesso em: 22 de maio de 2023.

RIBEIRO, R. B. et al. Crescimento do milho BRS catingueiro irrigado no cariri cearense. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.8, n.3, p.81-86, 2015.

RICHART, A. et al. Desempenho do milho safrinha e da Brachiaria ruziziensis cv. Comum em consórcio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, p. 497-502, 2010.

ROCHA, D. S. et al. Drought tolerance in intervarietal maize hybrids. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 1, p. 80- 89, 2021.

SANTOS, M. V. C. Modelling assessment of the maize crop growth, yield and soil water dynamics in the Northeast of Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 6, p. 897-904, 2020.

SANTOS, M. V. C. **Desempenho do modelo APSIM em crescimento e produtividade de milho em Alagoas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.

SANTOS, P. R. A. dos. et al. Características morfológicas e produtivas do milho no SBRISIA, A. F.; SILVA, S. C. da. Comparação de três métodos para estimativa do índice de área foliar em pastos de capim Marandu sob lotação contínua. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 212-220, 2008.

SCOPEL, E. et al. Consorciação de milho com culturas forrageiras para pequenos agricultores no centro do Brasil. **Agricultura Experimental**, v. 56, n. 4, p. 561-573, 2020.

SILVA, F. C. D. S. et al. Performance Produtiva de Cultivares de milho em três sistemas de cultivo no leste maranhense. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 3, p. 520-530, 2016.

SILVA, G. S. F. et al. Soil water dynamics and yield in corn and Brachiaria Ruziziensis intercropping. **Pesquisa agropecuária tropical**, v. 50, p.1-9, 2020.

SILVA, S. C. da. SBRISIA, A. F.; PEREIRA, L. E. T. Ecophysiology of C4 forage grasses - understanding plant growth for optimising their use and management. **Agriculture**, v. 5, n. 3, p. 598-625, 2015.

SOARES, M. A. et al. Fenologia, componentes de produção e rendimento agrícola do milho sob lâminas de irrigação na região de Rio Largo, Alagoas. **Irriga**, v. 25, n. 2, p. 279-295, 2020.

SOUZA, D. P. **Calibração de modelos produtivos e da dinâmica de água no solo da plataforma APSIM para capim-marandu, aveia preta e azevém**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021.

SOUZA, L. F. N. et al. Maize-Brachiaria grass intercropping: A meta-analysis of major productivity drivers in Brazil. **Field Crops Research**, v. 306, p. 109205, 2024.

STRIEDER, M. L. et al. Características de dossel e rendimento de milho em diferentes espaçamentos e sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 3, p. 309-317, 2008.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Tradução Mastroberti et al. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

YANG, C., LEI, H. Evaluation of data assimilation strategies on improving the performance of crop modeling based on a novel evapotranspiration assimilation framework. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 346, p. 1-18, 2024.

YANG, J. M. et al. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. **Agricultural Systems**, v. 127, p. 81-89, 2014.

ZAIONTZ, C. **Home**. Real Statistics Using Excel. Disponível em: www.real-statistics.com. Acesso em: 05 mar. 2020.

ZHANG, W. N. et al. Combining field data and modeling to better understand maize growth response to phosphorus (P) fertilizer application and soil P dynamics in calcareous soils. **Journal of Integrative Agriculture**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.07.034>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.

ZHAO, B. et al. Estimating the impacts of plant internal nitrogen deficit at key top dressing stages on corn productivity and intercepted photosynthetic active radiation. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 864258, 2022.

Zhou, J. et al. Calibration and validation of APSIM for maize grown in different seasons in Southwest tropic of China. **Chilean journal of agricultural research**, v. 82, p. 515- 672. Disponível em: <https://oes.chileanjar.cl/files/CJAR220074-82-4-2022.pdf>. Acesso em: 11 de maio de 2023.