

ANTONIO GEBSON PINHEIRO

**SIMULAÇÃO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS COM USO DO MODELO
AQUACROP PARAMETRIZADO PARA CULTURAS FORRAGEIRAS EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO**

RECIFE - PE
AGOSTO DE 2022

ANTONIO GEBSON PINHEIRO

**SIMULAÇÃO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS COM USO DO MODELO
AQUACROP PARAMETRIZADO PARA CULTURAS FORRAGEIRAS EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de concentração: Engenharia de Água e Solo).

Orientador: Profº. Dr. Thieres George Freire da Silva

RECIFE - PE
AGOSTO DE 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P654s

Pinheiro, Antonio Gebson

Simulação de sistemas agrícolas com uso do modelo Aquacrop parametrizado para culturas forrageiras em ambiente semiárido / Antonio Gebson Pinheiro. - 2022.
170 f. : il.

Orientador: Thieres George Freire da Silva.
Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2022.

1. Modelo de simulação. 2. Estratégias de cultivo. 3. Produção de forragem. 4. Resiliência agrícola. I. Silva, Thieres George Freire da, orient. II. Título

CDD 630

ANTONIO GEBSON PINHEIRO

**SIMULAÇÃO DE SISTEMAS AGRÍCOLAS COM USO DO MODELO
AQUACROP PARAMETRIZADO PARA CULTURAS FORRAGEIRAS EM
AMBIENTE SEMIÁRIDO**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Engenharia de Água e Solo).

DEFENDIDA em 31 de agosto de 2022.

Banca Examinadora

Prof^o. Dr. Thieres George Freire da Silva (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof^a. Dr^a. Daniela de Carvalho Lopes
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Prof^o. Dr. Antônio José Steidle Neto
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Dr. José Edson Florentino de Moraes
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof^a. Dr^a. Luciana Sandra Bastos de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

A minha família e em especial aos meus pais, Antônio Zacarias Pinheiro (*in memoriam*) e Maria de Fátima Pinheiro, exemplos de vida, a eles serei eternamente grato.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado, protegendo minha família e iluminando nossos caminhos.

Aos meus pais, Antônio Zacarias Pinheiro (*in memoriam*) e Maria de Fátima Pinheiro, por todo esforço para me proporcionarem o melhor. Agradeço a eles por toda educação, incentivo, amor e sabedoria.

Aos meus irmãos, Claudionor, Claudiana, Jorge e Jekson por tudo.

A minha companheira de todos os momentos, Sirleide Menezes, por todo o companheirismo, incentivo, paciência e amor. Sou grato por estar sempre ao meu lado, me apoiando nos mais diversos momentos da vida.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEA) pela oportunidade a que me foi dada e espero que, de alguma forma, tenha retribuído o que me foi investido.

A Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da Bolsa de estudos durante o curso.

A meu orientador e professor, Dr. Thieres George Freire da Silva, pela confiança, por todos os ensinamentos, incentivos e paciência ao longo dessa jornada acadêmica.

Ao Grupo de Agrometeorologia no Semiárido (GAS) por toda organização, estrutura e condução dos experimentos. Agradeço a todos que compõem este grupo e que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho: Cleber, Kaique, George, Alexandre, Marcelo, Hygor, Orlando, Jandis, João Pedro, Leonardo, Renan, Sidney, Gabriel, Abigail, Madalena, Areli, Carlos André, José Neto.

A todos os amigos que conheci durante essa fase, pessoas com quem convivi diariamente no decorrer dessa etapa tão importante e que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização desse momento.

A todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram com meu crescimento durante o decorrer desse trabalho.

“É melhor tentar e falhar, que preocupar-se a ver a vida passar.
É melhor tentar, ainda que em vão, que sentir-se fazendo nada até o final.
Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder.
Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver.”

Martin Luther King

“Deus é o dono de tudo,
Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar aonde cheguei,
Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm essa oportunidade,
Ele a deu para mim, não sei por quê,
Sei que não posso desperdiçá-la.”

Ayrton Senna

Pinheiro, Antonio Gebson. **Simulação de sistemas agrícolas com uso do modelo AquaCrop parametrizado para culturas forrageiras em ambiente semiárido**. 2022. 170f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.

RESUMO GERAL

O conhecimento das melhores estratégias de cultivos agrícola para fins de suprir a demanda de alimentos da pecuária em ambiente semiárido é fundamental, principalmente em períodos de escassez hídrica. Com isso, o objetivo do estudo foi calibrar e validar o modelo *AquaCrop* para simulação de arranjos produtivos de culturas forrageiras, indicando parâmetros de aplicações práticas e proporcionando perspectivas de produções para diferentes localidades no semiárido brasileiro. O modelo foi calibrado e validado em áreas agrícolas localizadas em Serra Talhada – PE, durante o período de 2019 a 2020. Foram simulados 29 arranjos agrícolas com cultivos de forrageiras como clones de palma forrageira e variedades de sorgo. Ao longo do ciclo foram coletados dados biométricos e de biomassa das plantas, informações sobre as condições e manejo do solo, variabilidade das condições climáticas, lâminas de irrigação e níveis de manejo agrícola. A consistência da parametrização do modelo *AquaCrop* foi realizada mediante análise de parâmetros estatísticos (*RMSE*, *NRMSE*, R^2 , *R*, *d* e *c*). Consecutivamente, o modelo parametrizado foi expandido na estimativa da produção de biomassa e calendário agrícola para 14 localidades representativas do semiárido, considerando suas respectivas características de solo e variáveis meteorológicas históricas (1961 – 2018). Com isso, constatou-se que o modelo *AquaCrop* resultou em erros admissíveis na predição da produtividade dos sistemas agrícolas avaliados, apresentando desempenho muito bom ($c > 0,80$) e coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,80. Os riscos de perdas aumentam quando o cultivo é realizado em condições de sequeiro e diminuem quando irrigado. Concluiu-se que o modelo *AquaCrop* é uma ferramenta eficaz na predição da produção de forrageiras e arranjos produtivos para o semiárido brasileiro, com aplicação direta na indicação de arranjos produtivos com melhores respostas e auxílio na elaboração do calendário agrícola, planejamento e tomadas de decisões. Contudo, investigações adicionais são necessárias na otimização do modelo aplicado a cultivos de forrageiras, integrando fatores bióticos nas simulações, além de diferentes arranjos de cultivos.

Palavras-chave: Modelo de simulação, estratégias de cultivo, produção de forragem, calendário agrícola.

Pinheiro, Antonio Gebson. **Simulation of agricultural systems using the parameterized AquaCrop model for forage crops in a semiarid environment**. 2022. 170f. Thesis (Ph.D. in Agricultural Engineering) - Rural Federal University of Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

GENERAL ABSTRACT

Knowledge of the best strategies for agricultural crops to meet the demand for food from livestock in a semiarid environment is essential, especially in periods of water scarcity. With this, the objective of the study was to calibrate and validate the AquaCrop model for simulating productive arrangements of forage crops, indicating parameters of practical applications and providing production perspectives for different locations in the Brazilian semiarid region. The model was calibrated and validated in agricultural areas located in Serra Talhada - PE, during the period from 2019 to 2020. 29 agricultural arrangements were simulated with forage crops such as forage cactus clones and sorghum varieties. Throughout the cycle, biometric and plant biomass data, information on soil conditions and management, variability of climate conditions, irrigation depths and levels of agricultural management were collected. The consistency of the parameterization of the AquaCrop model was performed through the analysis of statistical parameters (*RMSE*, *NRMSE*, R^2 , R , d and c). Consecutively, the parameterized model was expanded to estimate the biomass production and agricultural calendar for 14 locations representative of the semiarid region, considering their respective soil characteristics and historical meteorological variables (1961 - 2018). Thus, it was found that the AquaCrop model resulted in permissible errors in predicting the productivity of the evaluated agricultural systems, presenting a very good performance ($c > 0.80$) and a coefficient of determination (R^2) greater than 0.80. The risk of losses increases when cultivation is carried out under rainfed conditions and decreases when irrigated. It was concluded that the AquaCrop model is an effective tool in predicting forage production and productive arrangements for the Brazilian semiarid region, with direct application in the indication of productive arrangements with better responses and aid in the elaboration of the agricultural calendar, planning and decision-making. However, additional investigations are needed to optimize the model applied to forage crops, integrating biotic factors in the simulations, in addition to different cropping arrangements.

Keywords: Simulation model, cultivation strategies, forage production, agricultural calendar.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL.....	VIII
GENERAL ABSTRACT	IX
INTRODUÇÃO GERAL	18
Referências	20
CAPÍTULO I.....	25
LACUNAS DE PRODUTIVIDADES E ESTRATÉGIAS DE CULTIVO NA MELHORIA DA PRODUÇÃO DE FORRAGEM PARA A REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA - REVISÃO.....	26
Introdução.....	28
Fatores edafoclimáticos do semiárido brasileiro limitantes à produção agropecuária	29
Culturas forrageiras de potencial regional.....	34
Sorgo forrageiro	34
Milheto.....	37
Feijão-guandu	40
Girassol Forrageiro	42
Palma forrageira.....	44
Lacunas entre níveis de produtividade “Yield Gap”	47
Considerações finais	50
Referências	51
CAPÍTULO II	61
IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTURAS DIANTE DOS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE A PRODUÇÃO AGRÍCOLA - REVISÃO	62
Introdução.....	64
Alterações climáticas e impactos na agricultura.....	65
Uso da modelagem agrícola para simulação de sistemas produtivos.....	68
Aplicação dos principais modelos de simulação de crescimento de culturas agrícolas	69
Descrição do Agroecological Zone Model – FAO (AZM - FAO)	70
Modelo AquaCrop – FAO	72
Modelo Crop Simulation – CROPGRO.....	76
Modelo Agricultural Production Systems Simulator – APSIM	79
Considerações finais	81
Referências	82
CAPÍTULO III.....	92
CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA ARRANJOS PRODUTIVOS DE PLANTAS FORRAGEIRAS CACTÁCEAS E GRAMÍNEAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO	93
Introdução	95
Material e métodos.....	97

Área experimental e coleta de dados	97
Arranjos experimentais	98
Dados biométricos e de biomassa	102
Calibração e validação do modelo AquaCrop para os distintos sistemas produtivos.....	103
Análise estatística das simulações.....	106
Resultados	107
Consórcio palma forrageira-sorgo sob condições de irrigação complementar	107
Clones de palma forrageira sob distintos regimes hídricos	113
Resposta de clones de palma forrageira submetida a frequências de irrigação.....	116
Resposta agrônômica do consórcio entre palma forrageira-milheto em condições de solo com e sem cobertura morta	119
Adaptabilidade e reposta produtiva de diferentes clones de palma forrageira sob irrigação complementar.....	122
Efeitos produtivos da consorciação da palma com diferentes culturas forrageiras sob irrigação complementar.....	125
Efeitos produtivos da consorciação entre plantas forrageiras em condições exclusivas sob irrigação complementar.....	128
Discussão	129
Eficiência do modelo AquaCrop na calibração e validação para diferentes sistemas de cultivos de plantas forrageiras de forma exclusiva e consorciada em ambiente semiárido	129
Eficiência do modelo na parametrização do AquaCrop para diferentes sistemas agrícolas em ambiente semiárido.....	130
Conclusões	131
Referências.....	132
CAPÍTULO IV.....	139
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DA MASSA DE FORRAGEM DE SISTEMAS DE CULTIVO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO COM O MODELO AQUACROP	140
Introdução	142
Material e métodos.....	144
Descrição da área de Estudo	144
Dados climáticos.....	145
Descrição das condições de cultivos e arranjos agrícolas utilizadas nas simulações.....	146
Construção do calendário agrícola.....	148
Descrição do Modelo AquaCrop, entrada de dados e aplicação para as 14 localidades em estudo	148
Resultados	152
Especificação das características climáticas nas diferentes localidades.....	152
Resposta produtiva da interação entre sistemas de cultivos compostos por clones de palma forrageira e variedades de sorgo.....	154
Efeitos de práticas agrícolas na produção de biomassa em sistemas forrageiros.....	156
Discussão	159

Resposta produtiva do sistema palma-sorgo em consórcio e exclusivo	159
Adaptabilidade e desempenho de clones de palma forrageira em ambiente semiárido	159
Sistemas de cultivos forrageiros em condições irrigadas	159
Uso da cobertura morta em sistemas agrícola com pastagens	160
Adensamento de plantas na intensificação do uso da terra com plantas forrageiras	161
Produção agrícola em distintas condições ambientais	161
Conclusões	161
Referências	162
CONSIDERAÇÕES FINAIS	170

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I	25
Figura 1. Delimitação do semiárido brasileiro (Adaptado: SUDENE, 2017)	30
Figura 2. Localização de estações na região Semiárida com totais anuais de precipitação e evapotranspiração potencial, e a temperatura média do ar	31
Figura 3. Média histórica mensal de precipitação (mm), evapotranspiração potencial (mm) e temperatura (°C) de municípios localizados em diferentes estados do Semiárido brasileiro	32
Figura 4. Regionalização dos diferentes regimes pluviométricos (A) e sistemas atmosféricos de Baixa Troposfera (B) na América do Sul (Fonte: REBOITA et al., 2010)	33
Figura 5. Características morfológicas da cultura do sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	35
Figura 6. Área plantada de sorgo dos principais países produtores do mundo (FAOSTAT, 2019)	36
Figura 7. Características morfológicas da cultura do milho (<i>Pennisetum glaucum</i> L.)	38
Figura 8. Área plantada de milho com os principais países produtores do mundo (FAOSTAT, 2019)	39
Figura 9. Características morfológicas da cultura do feijão-guandu (<i>Cajanus cajan</i> (L.) Mill sp.)	41
Figura 10. Características morfológicas da cultura do girassol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	43
Figura 11. Média histórica da área plantada e produção do girassol no Brasil	44
Figura 12. Características da palma forrageira, desde seus aspectos morfológicos (A), e ilustração do seu metabolismo ácido das crassuláceas (B). Adaptado de Taguchi et al. (2017)	45
Figura 13. Distribuição da fotossíntese do metabolismo C ₃ ao metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) ao longo de um gradiente contínuo derivado de pesquisas em larga escala dos valores de $\delta^{13}C$ (‰) (CUSHMAN, 2017)	46
Figura 14. Níveis de produtividade agrícola mediante fatores agroclimáticos. Adaptado de Sentelhas et al. (2015); Van Ittersum et al. (2013)	48
CAPÍTULO II	61
Figura 1. Resumo das mudanças observadas no clima e outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul (Adaptado: IPCC, 2014)	65
Figura 2. Indicadores de mudanças climáticas. Concentrações médias globais de gases de efeito estufa (A) e da temperatura combinada da superfície terrestre e oceânica (B). Fonte: IPCC (2019)	66
Figura 3. Número de artigo de pesquisa relacionados a estudos com modelos de simulação de culturas publicados entre 2000 e 2020. Fonte: Portal de pesquisa de documentos Scopus - acessado em 21 de julho de 2021	68
Figura 4. Diagrama geral dos parâmetros originais e incluídos na Adaptação do Modelo da Zona Agroecológica (MZA – FAO)	71

Figura 5. Estrutura do modelo AquaCrop com destaque aos principais componentes da interação solo-planta-atmosfera e parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I – irrigação; Tn – temperatura mínima do ar; Tx – temperatura máxima do ar; ET ₀ – evapotranspiração de referência; E – evaporação do solo; Tr – transpiração da cultura; gs – condutância estomática; WP – produtividade da água; HI (IC) – índice de colheita; CO ₂ – concentração de dióxido atmosférico; Escoamento – escoamento superficial; (1), (2), (3), (4) – diferentes respostas ao estresse hídrico. As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos e as linhas tracejadas indicam retroalimentação. Adaptado de Steduto et al. (2009)	74
Figura 6. Diagrama do modelo DSSAT com seus bancos de dados, aplicativos e componentes de software. Adaptado de Jones et al. (2003)	77
Figura 7. Representação da estrutura do modelo APSIM com os módulos individuais de cultura e solo, módulos e mecanismos de simulação. Adaptado de Keating et al. (2003) e McCown et al. (1995)	80
CAPÍTULO III	92
Figura 1. Localização do “Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras” (A), balanço hídrico climatológico entre 2019 e 2020 (B), município de Serra Talhada, PE, Brasil	97
Figura 2. Dados meteorológicos e de irrigação durante os ciclos agrícolas das seguintes unidades produtivas: cultivos irrigados exclusivos e consorciados de clones de palma e cultivares de sorgo (A); clones de palma em sequeiro e irrigados com base na fração de 40%, 80% e 120% da ET _c (evapotranspiração da cultura) (B); clones de palma irrigados com frequências de 7, 14, 21 e 28 dias (C); plantios irrigados exclusivos e consorciados de palma e milho com e sem uso de cobertura morta (D); clones de palma sob irrigação complementar (E); consorciação de palma irrigada com sorgo e milho (F)	99
Figura 3. Fluxograma do processo de simulação do Modelo AquaCrop	104
Figura 4. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel para a MIU (A), IPA (B) e OEM (C) e biomassa MIU (D), IPA (E) e OEM (C) em sistema de consórcio com as variedades de sorgo e exclusiva sob irrigação complementar no semiárido brasileiro	108
Figura 5. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel e biomassa para P288 (A), 467 (B) e SF11 (C) e biomassa do P288 (D), 467 (E) e SF11 (C) em consórcio com os clones de palma e exclusiva sob irrigação no semiárido brasileiro	111
Figura 6. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel (A, B e C) e biomassa (D, E e F) dos clones de palma forrageira MIU, IPA e OEM com distintos regimes hídricos (0%, 40%, 80% 120%) com base na ET _c no semiárido brasileiro	114
Figura 7. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel (A, B e C) e biomassa (D, E e F) dos clones de palma forrageira MIU, IPA e OEM com diferentes frequências de irrigação (7, 14, 21 e 28 dias) no semiárido brasileiro	117
Figura 8. Simulação da influência da cobertura morta no desenvolvimento da cobertura do dossel (A e B) e biomassa (C e D) do clone de palma forrageira OEM e do milho, em condições exclusivas e consorciadas no semiárido brasileiro	120

Figura 9. Simulação do desenvolvimento cobertura do dossel (A e B) e produção de biomassa (C e D) dos clones de palma forrageira MIU, IPA, OEM, F8, V19 e Orelha de Elefante Africana (OEA), conduzidas sob irrigação complementar e sistema de plantio exclusivo no semiárido brasileiro	123
Figura 10. Simulação do desenvolvimento de cobertura do dossel (A, B e C) e produção de biomassa (D, E e F) do clone de palma forrageira OEM cultivado de forma exclusiva e consorciado com variedades de sorgo (SF15 e 1011) e milho sob irrigação complementar no semiárido brasileiro	126
Figura 11. Efeito na produtividade ocasionado plantio consorciado entre a palma com outras culturas forrageiras	128
CAPÍTULO IV	139
Figura 1. Localização geográfica dos municípios para aplicação do modelo AquaCrop	145
Figura 2. Distribuição da média histórica mensal das variáveis climáticas de temperatura (°C), precipitação (mm) e Evapotranspiração de referência – ET ₀ (mm).....	153
Figura 3. Simulação do calendário agrícola para os clones de palma forrageira (IPA, MIU, OEM) e sorgo (467, P288, SF11) cultivados de forma exclusivos (SE) e em consórcio, além das condições simuladas em sequeiro (S) e com uso da irrigação (I).....	155
Figura 4. Simulação da Resposta produtiva realizada pelo modelo AquaCrop para os clones de palma forrageira (IPA, MIU, OEM) em sistemas de irrigação com 80 da ET _c (IPA-80%, MIU-80% e OEM-80%), IPA com frequência de irrigação de 7 dias (IPA-07D), MIU com frequência de irrigação.....	157

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I	25
Tabela 1. Principais países produtores de sorgo no mundo	36
Tabela 2. Levantamento da safra 2017/18 do sorgo no Brasil. Fonte: CONAB (2018).....	37
Tabela 3. Principais países produtores de milho no mundo	40
Tabela 4. Principais países produtores de feijão guandu no mundo	42
CAPÍTULO II	61
Tabela 1. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo AquaCrop	75
Tabela 2. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo COPGRO – DSSAT.....	78
Tabela 3. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo APSIM	81
CAPÍTULO III	92
Tabela 1. Propriedades físico-químicas do solo Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico na camada 0,00 – 0,80 m no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.....	98
Tabela 2. Parâmetros iniciais utilizados na calibração do modelo <i>AquaCrop</i>	105
Tabela 3. Parâmetros do <i>AquaCrop</i> utilizados para calibração dos clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com as cultivares de sorgo (P288, 467 e SF11)	109
Tabela 4. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para os clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com as cultivares de sorgo (P288, 467 e SF11)	110
Tabela 5. Principais parâmetros do <i>AquaCrop</i> utilizados para calibração das cultivares de sorgo forrageiro (P288, 467 e SF11) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com os clones de palma (MIU, IPA e OEM)	112
Tabela 6. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da Cobertura do Dossel e Biomassa para as cultivares de sorgo forrageiro (P288, 467 e SF11) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM)	113
Tabela 7. Principais parâmetros do <i>AquaCrop</i> utilizados para calibração dos clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes lâminas de irrigação (0, 40, 80 e 120% da ET_c).....	115
Tabela 8. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da Cobertura do Dossel e Biomassa para os clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes lâminas de irrigação (0, 40, 80 e 120% da ET_c)	116
Tabela 9. Principais parâmetros do <i>AquaCrop</i> utilizados para calibração dos clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes regimes hídricos (7, 14, 21 e 28 dias)	118
Tabela 10. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para os clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob regimes hídricos (7, 14, 21 e 28 dias)	119

Tabela 11. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone de palma forrageira OEM cultivado de forma exclusiva e em consórcio com o milho sem e com uso cobertura morta	121
Tabela 12. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone de palma forrageira OEM cultivado de forma exclusiva e em consorcio com o milho sem e com uso de cobertura morta	122
Tabela 13. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para os clones de palma forrageira MIU, IPA, OEM, OEA, V19 e F8 com irrigação e cultivados de forma exclusiva	124
Tabela 14. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da Cobertura do Dossel e Biomassa para os clones de palma forrageira MIU, IPA, OEM, OEA, V19 e F8 sob condição de cultivo exclusivo e irrigado	125
Tabela 15. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone de palma forrageira OEM em diferentes sistemas produtivos.....	127
Tabela 16. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone OEM dentro diferentes sistemas de produção	128
CAPÍTULO IV	139
Tabela 1. Descrição das unidades produtivas com palma forrageira e sorgo, compreendendo: consórcio de culturas, distintos clones, diferentes regimes hídricos, frequências de irrigação, adensamento de plantio	147
Tabela 2. Principais características dos perfis dos solos para os municípios analisados.....	150
Tabela 3. Parâmetros iniciais utilizados na calibração do modelo AquaCrop	151

INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro tem extensão territorial de 1.127.953 km², representando 73% da região do Nordeste e 13% do território nacional (SUDENE, 2017). Ao todo, são registrados 1.262 municípios distribuídos em dez Estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe. Com quase 2 milhões de habitantes é a região com clima semiárido com maior população do mundo (IBGE, 2018), além de apresentar condições heterogêneas de clima, com valores médios de precipitação pluvial inferior a 800 mm ano⁻¹, alta evapotranspiração potencial ~ 2.000 mm ano⁻¹, temperatura do ar de 25 °C e umidade relativa do ar de 64% (Alvares et al., 2013; Alves et al., 2015; Medeiros et al., 2020; Silva et al., 2021).

A irregularidade espaço-temporal na distribuição da precipitação pluvial associada a ineficientes práticas de manejo influenciam diretamente a produção de forragem nessa região, principalmente nos períodos do ano com maiores déficits hídricos (Er-Raki et al., 2021). Diante disso, aproximadamente 50% da população do semiárido brasileiro, que trabalham diretamente na agricultura de subsistência, especialmente em pequenas propriedades com cultivos em sequeiro são afetados, principalmente devido às limitações hídricas (Sousa et al., 2021).

Assim, buscando otimizar o uso dos recursos naturais existentes e elevar o nível de produtividade das culturas forrageiras, é essencial a adoção de medidas que visem a melhoria da resiliência agrícola, possibilitando maior estabilidade anual na oferta de forragem (Araújo Júnior, Jardim, et al., 2021; Dias-Martins et al., 2018), como a adoção de culturas forrageiras adaptadas ao clima da região e práticas de manejos agrícolas. Vale destacar algumas culturas que se sobressaem pela capacidade adaptativa e de produção, como a palma forrageira (*Opuntia spp.* e *Nopalea spp.*), o sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e o milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) que apresentam tolerância as condições ambientais e elevada produtividade (Devi et al., 2014; Lauriault et al., 2021; Pino e Heinrichs, 2017).

O conhecimento dos níveis produtivos, bem como os fatores redutores que interferem diretamente na produção final são importantes. Para tanto, diferentes conceitos e metodologias foram elaboradas para determinar e quantificar as quebras de produtividade (“Yield Gap”), levando-se em consideração as condições ambientais, características biológicas das culturas e condições de manejo agrícola. A partir desse princípio pode ser realizada a diferença entre produtividade potencial, determinada por meio de modelos de simulação, produtividade atingível e a produtividade real (Battisti et

al., 2018; Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2016; Sentelhas et al., 2015; Silva et al., 2017).

A compreensão das respostas das culturas às variáveis ambientais, mudanças climáticas e práticas de manejo torna-se uma ferramenta fundamental para o planejamento e tomadas de decisões nas atividades agropecuárias (Chapagain et al., 2022). Com isso, o uso de modelos de simulação de culturas constitui-se como importantes ferramentas, capaz de representar as interações (culturas, solo, atmosfera e manejo), e gerar informações sobre rendimentos das culturas, balanço hídrico em resposta as variações climáticas, e otimização das estratégias de manejo (Chitsiko et al., 2022; Saadi et al., 2022; Z. Wang et al., 2022).

Diversos estudos e modelos foram desenvolvidos no mundo (Crop-Syst, EPIC, DSSAT, WOFOST, STICS e AquaCrop), em combinação com pesquisas experimentais, permitindo o uso de séries temporais e de manejo de campo. Dentre esses, o modelo AquaCrop, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura – FAO (Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2009), simula a evolução da biomassa do cultivo em resposta ao balanço hídrico, destacando-se pelo equilíbrio entre simplicidade de uso, quantidade reduzida de dados de entrada, além da precisão e robustez nos resultados simulados (Huang et al., 2022; Wu et al., 2022). Apesar da aplicação do modelo AquaCrop para diversas culturas como a soja batata (Razzaghi et al., 2017), cana de açúcar (Bahmani e Eghbalian, 2018; Farooq e Gheewala, 2020), girassol (Saab et al., 2014), feijão (Magalhães et al., 2019), soja (Adeboye et al., 2021; Giménez et al., 2017), milho (Bello e Walker, 2016; Guo et al., 2018), milho (Van Gaalen et al., 2015; Zhu et al., 2021), sorgo (Araya et al., 2016; Hadebe et al., 2017), ainda são insuficientes os trabalhos de sua aplicação para cactos, além da necessidade de ampliação do conhecimento dos parâmetros para o sorgo e milho em condições semiáridas.

Nesse contexto, a compilação dessas informações é fundamental na otimização do Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), caracterizada como instrumento de gestão dos riscos na agricultura, desenvolvido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (MAPA, 2022). Com isso, é possível a ampliação da escala de execução do mapeamento, além de incrementar a interação entre culturas forrageiras e manejos agrícolas sob diferentes cenários climáticos.

Referências

- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Adekalu, K. O., Osunbitan, J. A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*, 8(3), 419–436. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2020.10.002>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Moraes Gonçalves, J. L., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alves, M., Alejandro, F., Souza, A., Sergio, C. (2015). Dendrochronologia Influence of regional rainfall and Atlantic sea surface temperature on tree-ring growth of *Poincianella pyramidalis*, semiarid forest from Brazil. *Dendrochronologia*, 35, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.007>
- Araújo Júnior, G. N., Jardim, A. M. R. F., Silva, M. J., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Costa, S. A. T., Cunha, M. V., Simões, A. N., Silva, J. R. I., Souza, L. S. B., Silva, T. G. F. (2021). Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. *European Journal of Agronomy*, 131(April). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>
- Araya, A., Kisekka, I., Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Bahmani, O., Eghbalian, S. (2018). Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model. *Agricultural Research*, 7(2), 158–166. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0311-0>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pascoalino, J. A. L., Sako, H., Dantas, J. P. S., Moraes, M. F. (2018). Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. *International Journal of Plant Production*, 12(3), 159–168. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>
- Bello, Z. A., Walker, S. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for pearl millet (*Pennisetum glaucum*). *Crop and Pasture Science*, 67(9), 948–960. <https://doi.org/10.1071/CP15226>
- Chapagain, R., Remenyi, T. A., Harris, R. M. B., Mohammed, C. L., Huth, N., Wallach, D., Rezaei, E. E., Ojeda, J. J. (2022). Decomposing crop model uncertainty: A systematic review. *Field Crops Research*, 279, 108448. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2022.108448>
- Chitsiko, R. J., Mutanga, O., Dube, T., Kutuywayo, D. (2022). Review of current models

- and approaches used for maize crop yield forecasting in sub-Saharan Africa and their potential use in early warning systems. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103199. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2022.103199>
- Devi, P. B., Vijayabharathi, R., Sathyabama, S., Malleshi, N. G., Priyadarisini, V. B. (2014). Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(6), 1021–1040. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0584-9>
- Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L. F., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023>
- Er-Raki, S., Bouras, E., Rodriguez, J. C., Watts, C. J., Lizarraga-Celaya, C., Chehbouni, A. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agricultural Water Management*, 245, 378–3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106585>
- Farooq, N., Gheewala, S. H. (2020). Assessing the impact of climate change on sugarcane and adaptation actions in Pakistan. *Acta Geophysica*, 68(5), 1489–1503. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00463-8>
- Fischer, R. A. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.006>
- Giménez, L., Paredes, P., Pereira, L. S. (2017). Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. *Water* 2017, Vol. 9, Page 393, 9(6), 393. <https://doi.org/10.3390/W9060393>
- Guo, D. X., Chen, C. F., Guo, P. Y., Yuan, X. Y., Xing, X. G., Ma, X. Y. (2018). Evaluation of AquaCrop model for foxtail millet (*Setaria italica*) growth and water use with plastic film mulching and no mulching under different weather conditions. *Water (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/w10070836>
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. *Water SA*, 43(2), 209. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i2.05>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>

- Huang, M., Wang, C., Qi, W., Zhang, Z., Xu, H. (2022). Modelling the integrated strategies of deficit irrigation, nitrogen fertilization, and biochar addition for winter wheat by AquaCrop based on a two-year field study. *Field Crops Research*, 282, 108510. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2022.108510>
- Lauriault, L. M., Schmitz, L. H., Cox, S. H., Scholljegerdes, E. J. (2021). A Comparison of Pearl Millet and Sorghum–Sudangrass Pastures during the Frost-Prone Autumn for Growing Beef Cattle in Semiarid Region. *Agriculture 2021*, Vol. 11, Page 541, 11(6), 541. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11060541>
- Linker, R., Ioslovich, I., Sylaios, G., Plauborg, F., Battilani, A. (2016). Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*, 163, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.011>
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., Field, C. B. (2009). Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 179–204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>
- Magalhães, I. D., Lyra, G. B., Souza, J. L., Teodoro, I., Rocha, A. E. Q., Cavalcante Júnior, C. A., Lyra, G. B., Ferreira Junior, R. A., Carvalho, A. L., Ferraz, R. L. S. (2019). Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. *Australian Journal of Crop Science*, 13(7), 1188–1196. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1790>
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Beserra, E. A., Lacerda, F. F. (2011). Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*.
- Medeiros, A. S., Maia, S. M. F., Santos, T. C., Araújo Gomes, T. C. (2020). Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287(December 2018), 106690. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>
- Pino, F., Heinrichs, A. J. (2017). Sorghum forage in precision-fed dairy heifer diets. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 224–235. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11551>
- Razzaghi, F., Zhou, Z., Andersen, M. N., Plauborg, F. (2017). Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, 191, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.008>
- Saab, M. T. A., Albrizio, R., Nangia, V., Karam, F., Roupael, Y. (2014). *Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with Aquacrop.*

8(October).

- Saadi, S., Pattey, E., Jégo, G., Champagne, C. (2022). Prediction of rainfed corn evapotranspiration and soil moisture using the STICS crop model in eastern Canada. *Field Crops Research*, 287, 108664. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2022.108664>
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, 153(08), 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Monteiro, L. A., Duarte, Y. (2016). *Yield Gap - Conceitos, definições e exemplos. January.*
- Silva, J. V., Reidsma, P., Laborte, A. G., van Ittersum, M. K. (2017). Explaining rice yields and yield gaps in Central Luzon, Philippines: An application of stochastic frontier analysis and crop modelling. *European Journal of Agronomy*, 82, 223–241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.017>
- Silva, T. G. F., Queiroz, M. G., Zolnier, S., Souza, L. S. B., Souza, C. A. A., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Steidle Neto, A. J., Santos, T. S., Melo, A. L., Cruz Neto, J. F., Silva, M. J., Alves, H. K. M. N. (2021). Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. *Soil and Tillage Research*, 207, 104852. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2020.104852>
- Silva, T. G. F., Queiroz, M. G., Zolnier, S., Souza, L. S. B., Souza, C. A. A., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Steidle Neto, A. J., Santos, T. S., Melo, A. L., Cruz Neto, J. F., Silva, M. J., Alves, H. K. M. N. (2021). Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. *Soil and Tillage Research*, 207, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104852>
- Sousa, M. G., Araujo, J. K. S., Ferreira, T. O., Andrade, G. R. P., Araújo Filho, J. C., Fracetto, G. G. M., Santos, J. C. B., Fracetto, F. J. C., Lima, G. K., Souza Junior, V. (2021). Long-term effects of irrigated agriculture on Luvisol pedogenesis in semi-arid region, northeastern Brazil. *CATENA*, 206(February), 105529. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105529>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H.,

- Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J., Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: Evaluation of the AquaCrop procedure. *Journal of Agricultural Science*, 153(7), 1218–1233. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000872>
- Van Ittersum, M. K., Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52(3), 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- Wang, Z., Ye, L., Jiang, J., Fan, Y., Zhang, X. (2022). Review of application of EPIC crop growth model. *Ecological Modelling*, 467, 109952. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2022.109952>
- Wu, H., Yue, Q., Guo, P., Xu, X., Huang, X. (2022). Improving the AquaCrop model to achieve direct simulation of evapotranspiration under nitrogen stress and joint simulation-optimization of irrigation and fertilizer schedules. *Agricultural Water Management*, 266, 107599. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107599>
- Zhu, X., Xu, K., Liu, Y., Guo, R., Chen, L. (2021). Assessing the vulnerability and risk of maize to drought in China based on the AquaCrop model. *Agricultural Systems*, 189(December 2020), 103040. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103040>

CAPÍTULO I

**LACUNAS DE PRODUTIVIDADES E ESTRATÉGIAS DE CULTIVO NA
MELHORIA DA PRODUÇÃO DE FORRAGEM PARA A REGIÃO
SEMIÁRIDA BRASILEIRA – REVISÃO**

LACUNAS DE PRODUTIVIDADES E ESTRATÉGIAS DE CULTIVO NA MELHORIA DA PRODUÇÃO DE FORRAGEM PARA A REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA - REVISÃO

Resumo: A pecuária é uma atividade econômica fundamental para a região semiárida, porém é diretamente influenciada por fatores como as características do solo, qualidade da forragem e a sazonalidade pluviométrica. A irregularidade desses fatores reduz os níveis de produtividade, tornando-os dependentes das condições climáticas. Nesse sentido, o conhecimento das principais causas redutoras da produtividade e a adoção de práticas agrícolas resilientes são essenciais na redução dos efeitos sazonais do clima, aumentando a oferta de forragem no período de escassez hídrica. O uso de forrageiras adaptadas e com potencial produtivo constitui-se eficiente prática de resiliência agrícola, dentre elas destacam-se a palma forrageira, sorgo, milheto, feijão guandu e girassol. Essas constituem-se com elevada capacidade de conversão hídrica em matéria seca, complementação nutricional e aumento produtivo. Adicionalmente, a implementação de práticas agrícolas (consorciação, irrigação, adensamento, cobertura, etc.) contribuem na otimização dos recursos naturais e proporcionam melhores resultados no subsídio contínuo da produção de forragem. Com isso, o presente estudo teve como objetivo apresentar as características ambientais do semiárido brasileiro, expor conceitos sobre os níveis de produtividade e os principais fatores das lacunas de produção, além de difundir estratégias mitigatórias de produção de forragem. Após compilação dessas informações, destaca-se a importância de plantas forrageiras adaptadas e a adoção de práticas de manejo agrícola como estratégias para atenuar os efeitos sazonais do clima, contribuindo no subsídio contínuo da produção de forragem. Paralelamente, a análise de *Yield Gap* permite o conhecimento mais amplo dos fatores limitantes de produção, direcionando o planejamento agrícola de forma mais eficiente.

Palavras-chave: plantas forrageiras; semiárido brasileiro; agricultura.

YIELD GAP AND CULTIVATION STRATEGIES IN IMPROVING FORAGE PRODUCTION FOR THE BRAZILIAN SEMI-ARID REGION - REVIEW

Abstract: Livestock farming is a fundamental economic activity for the semi-arid region, but it is directly influenced by factors such as soil characteristics, forage quality and rainfall seasonality. The irregularity of these factors reduces productivity levels, making them dependent on climatic conditions. In this sense, the knowledge of the main causes that reduce productivity and the adoption of resilient agricultural practices are essential in reducing the seasonal effects of the climate, increasing the supply of forage in the period of water scarcity. The use of adapted forage crops and with productive potential constitutes an efficient agricultural resilience practice, among which stands out the forage cactus, sorghum, millet, pigeon pea and sunflower. These are constituted with a high capacity for water conversion into dry matter, nutritional complementation and increased production. In addition, the implementation of practices (e.g. intercropping, irrigation, densification, mulch, etc.) contribute to the optimization of natural resources and provide better results in the continuous subsidy of forage production. With this, the present study aimed to present the environmental characteristics of the Brazilian semiarid region, to expose concepts about the levels of productivity and the main factors of the production gaps, in addition to disseminating mitigation strategies of forage production. After compiling this information, it highlights the importance of adapted forage crops and the adoption of agricultural management practices as strategies to mitigate the seasonal effects of the climate, contributing to the continuous subsidy of forage production. At the same time, the *Yield Gap* analysis allows for a broader knowledge of the limiting factors of production, directing agricultural planning more efficiently.

Key words: forage crops; Brazilian semi-arid; agriculture.

Introdução

A pecuária brasileira representa 31% do Produto Interno Bruto do agronegócio do país, e compreende uma atividade de mitigação à vulnerabilidade socioeconômica da região semiárida, sendo mais estável ao longo do ano que a agricultura. (Moraes et al., 2019; A. T. Nunes et al., 2016; Veloso et al., 2020). Entretanto, a sazonalidade anual na produção de forragem na região semiárida apresenta-se como grande adversidade sob sistema de sequeiro, podendo ocasionar desequilíbrio entre a sua oferta e a demanda de ração animal (Bell et al., 2018).

Nesse sentido, o conhecimento dos principais fatores que ocasionam tal desequilíbrio na relação oferta \times demanda de forragem e nos sistemas agrícolas é fundamental na definição das melhores estratégias de plantio (Lobell et al., 2009; Pourhadian et al., 2019; Zu et al., 2018). Para tal, diversos estudos baseiam-se na metodologia mundialmente conhecida pelo termo “Yield Gap”, que se relaciona aos distintos modelos ecológicos de produção agrícola. A estimativa da “Yield Gap” pode ser realizada pela diferença entre a produtividade potencial (Y_P), obtida por meio de modelos de simulação, a produtividade atingível (Y_A) e a produtividade real (Y_R) (Battisti et al., 2018; Fischer, 2015; Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2016; Sentelhas et al., 2015; Silva et al., 2017; Van Ittersum e Rabbinge, 1997).

Diversos estudos com culturas forrageiras e sistemas de cultivos alternativos têm sido amplamente realizados a fim de minimizar os efeitos do déficit hídrico e a sazonalidade climática na produção de forragem durante todo o ano. Como resultados, verificou-se que a palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) constitui-se como fonte importante de forragem pela alta capacidade de adaptação e pelo alto potencial produtivo em condições de déficit hídrico na região semiárida (Costa et al., 2009; Silva et al., 2015, 2017; Jardim et al., 2021a). Além de apresentar alta eficiência no uso da água, conteúdo de água elevado na planta e elevado rendimento de biomassa (Moraes et al., 2019; Taiz et al., 2017).

A palma forrageira, apesar de adaptada a regiões com altas restrições hídricas, apresenta baixo teor de fibras e lento desenvolvimento vegetativo (Silva et al., 2015; Siqueira et al., 2017). Com isso, a adoção de práticas agrícolas resilientes pode elevar a produção de alimentos e otimizar o uso eficiente dos recursos naturais no semiárido brasileiro. Dentre essas práticas, a consorciação da palma com outras culturas forrageiras (sorgo, milho, feijão guandu e girassol) e o adensamento são importantes na minimização dos efeitos sazonais da produção de forragem, na suplementação alimentar

e no aumento de produção (Cardoso et al., 2019; Lima et al., 2018; Morugán-Coronado et al., 2020; Jardim et al., 2021b). O uso de irrigações complementares minimiza as oscilações da produção de forragem nos períodos mais secos do ano (Diniz et al., 2017). Já a cobertura morta reduz o impacto da radiação solar direta no solo, eleva o conteúdo de matéria orgânica e proporciona maior conservação da umidade (Carvalho et al., 2017; Alves et al., 2018).

Esta revisão teve como objetivo reunir informações sobre as principais características climáticas da região do Nordeste brasileiro, investigar a importância da Pecuária como fonte de atenuação à vulnerabilidade agrícola. Além de recomendar sistemas de produção mais adequados para a região, mediante conhecimento dos principais fatores limitantes, e, com isso, otimizar o planejamento e desenvolvimento das políticas agrícolas e tomadas de decisões.

Fatores edafoclimáticos do semiárido brasileiro limitantes à produção agropecuária

As regiões semiáridas são um subtipo de clima seco com um índice de aridez (razão entre precipitação e evapotranspiração potencial anuais) entre 0,20 e 0,50. A maioria dos solos dessas regiões exibem textura arenosa, baixa concentração de carbono orgânico, baixa capacidade de retenção de água, além de fertilidade reduzida (Garcia-Franco et al., 2018; Lal, 2004).

No Brasil, de acordo com o Instituto Nacional de Semiárido Brasileiro (INSA, 2017), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) e a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE, 2017), o semiárido apresenta área de 1.127.953 km², correspondendo a 73% e 13% da região Nordeste e do território nacional, respectivamente. Ao todo, a região semiárida está localizada na região nordeste do Brasil e norte de Minas Gerais, com 1.262 municípios situados em dez Estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Minas Gerais, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe (Figura 1). É a região semiárida com maior população do mundo, com quase 2 milhões de habitantes (IBGE, 2010). E que apresenta grande importância na pecuária extensiva e na agricultura de sequeiro, as quais normalmente são desenvolvidas por pequenos agricultores, que realizam cultivos após a queima da vegetação nativa (Souza Medeiros et al., 2020; Silva et al., 2017).

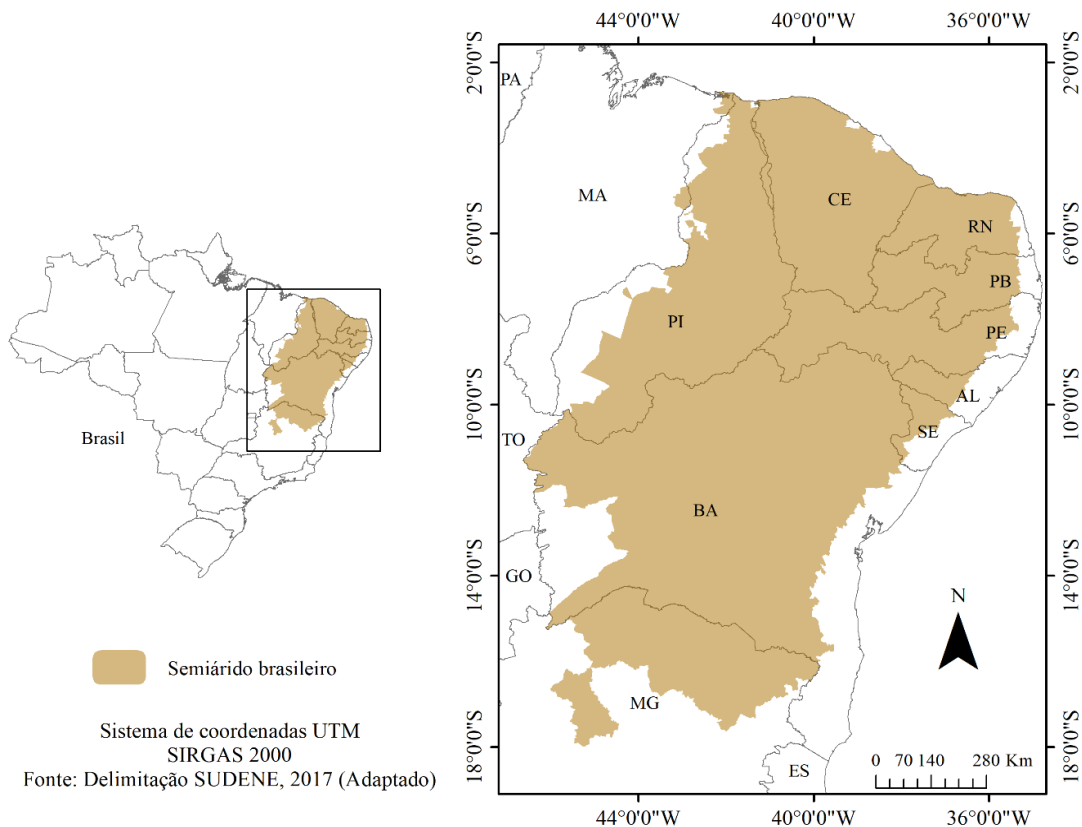


Figura 1. Delimitação do semiárido brasileiro (Adaptado: SUDENE, 2017).

A região do semiárido brasileiro apresenta média pluviométrica acumulada inferior a 800 mm ano^{-1} , alta evapotranspiração potencial, aproximadamente $2.000 \text{ mm ano}^{-1}$, além de temperaturas altas, em torno de 25 °C ao longo do ano (Alvares et al., 2013; Alves et al., 2015; Medeiros et al., 2020; Marengo et al., 2011), fato evidenciado mediante análise da Figura 2, na qual são destacados os respectivos dados históricos (1981-2010) para municípios localizados em diferentes regiões do semiárido brasileiro.

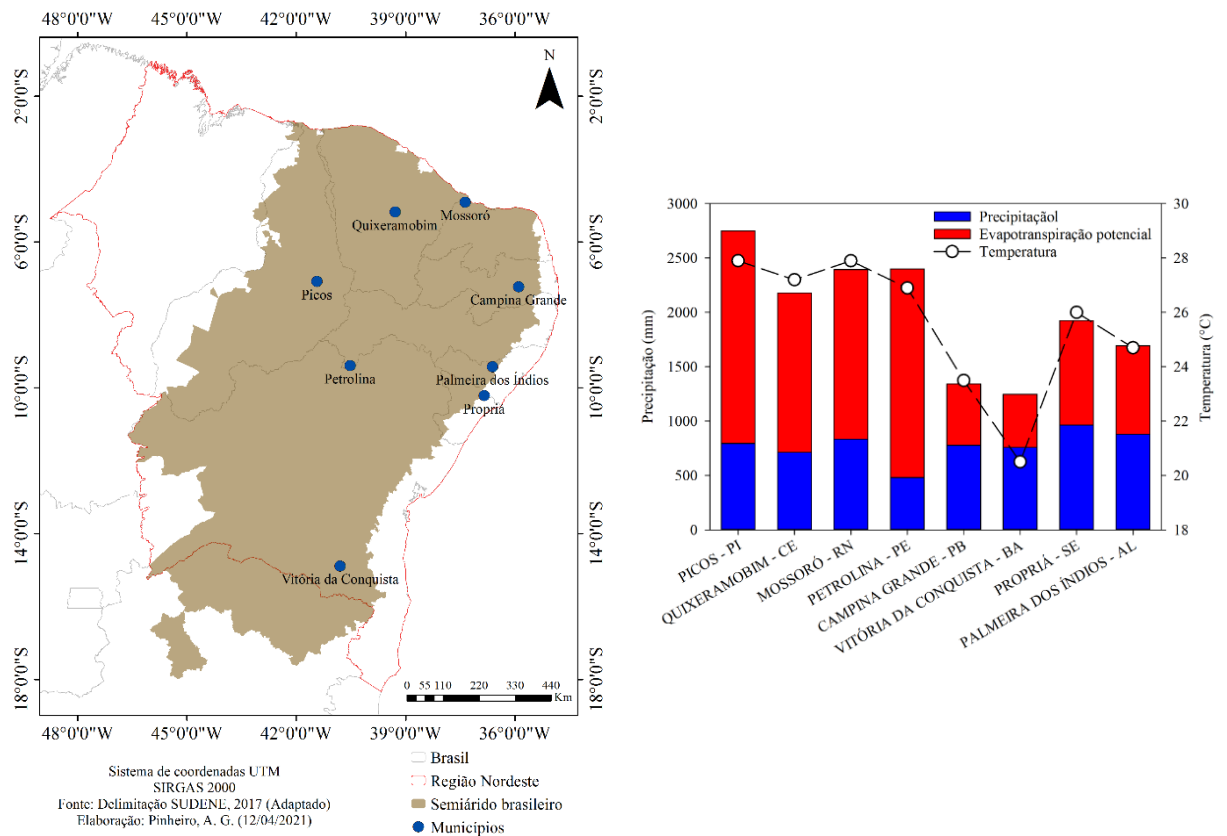


Figura 2. Localização de estações na região semiárida com totais anuais de precipitação, evapotranspiração potencial e temperatura média do ar.

Historicamente, o semiárido brasileiro apresenta alta sazonalidade na distribuição pluviométrica ao longo do ano (Alvares et al., 2013). A região concentra a maioria dos eventos pluviométricos em torno de quatro a cinco meses, e o restante do ano é caracterizado por apresentar escassez hídrica (Figura 3).

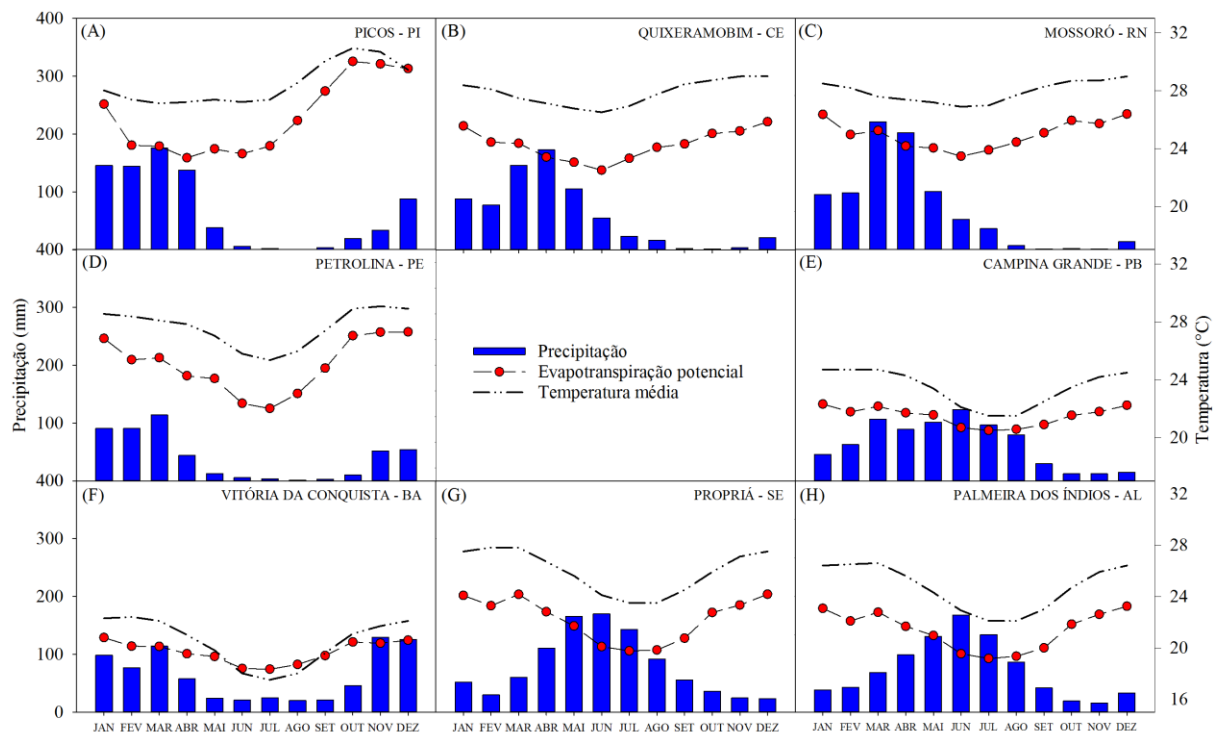


Figura 3. Média histórica mensal de precipitação (mm), evapotranspiração potencial (mm) e temperatura (°C) de municípios localizados em diferentes estados do semiárido brasileiro.

O clima no sertão nordestino brasileiro apresenta precipitações máximas na estação verão/outono e mínimas no inverno, como evidenciado na região R7 (Figura 4A). Essa região é diretamente influenciada pela atuação de sistemas atmosféricos que determinam a distribuição espaço-temporal das chuvas. Tais sistemas atmosféricos são oriundos do ramo descendente da atividade convectiva na Amazônia, Zona de Convergência Intertropical - ZCIT, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis subtropicais e tropicais - VCANs, frentes frias e quentes, e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul – ASAS (Reboita et al., 2010; Jardim et al., 2019) (Figura 4B). Esses distúrbios são influenciados pela temperatura da superfície do mar (TSM), interferindo diretamente na ocorrência de períodos mais úmidos ou mais secos no Nordeste brasileiro (Alves et al., 2015; Marengo et al., 2011; Costa et al., 2021).

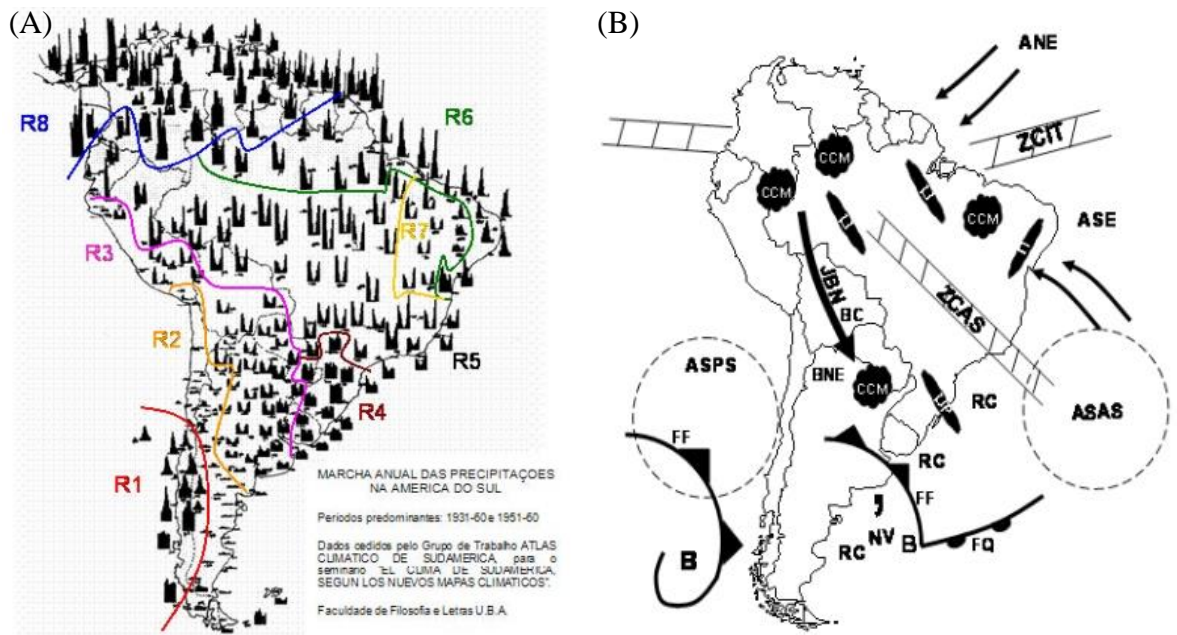


Figura 4. Regionalização dos diferentes regimes pluviométricos (A) e sistemas atmosféricos de Baixa Troposfera (B) na América do Sul (Fonte: Reboita et al., 2010).

A vegetação sazonalmente seca presente no semiárido brasileiro é a caatinga, que comporta em torno de 5.300 espécies (Althoff et al., 2016; Alves et al., 2015; de Almeida et al., 2019; Queiroz et al., 2021). Esse bioma tem como principal característica espécies xerofíticas, lenhosas com topos descontínuos, cuja forma principal são espécies suculentas (cactos) e arbustos, situados em solos sedimentares, e vegetação decídua e semidecídua em locais de solos mais ricos de nutrientes (Silva e Lacher, 2020; Queiroz et al., 2019). Quase 80% da caatinga teve alteração de sua forma natural (Vieira et al., 2013). Tais modificações podem ser oriundas de três principais causas: a substituição de grandes áreas de vegetação nativa por áreas de agricultura comercial, reservatórios hídricos, além da construção de rodovias; modificações severas diante de práticas como corte e queima; além da introdução de espécies exóticas de animais e plantas (Silva e Lacher, 2020).

Tais processos contínuos e de intensa modificação no bioma caatinga associados com as adversidades climáticas da região ocasionam perdas de biodiversidade, redução da fertilidade do solo e aceleração dos processos erosivos (Silva et al., 2017; Souza et al., 2015). Como consequência há efeitos na atividade agropecuária, por causa das implicações no clima local e no aporte forrageiro para os animais. Diante desse cenário é fundamental a adoção de práticas resilientes para atenuar as oscilações socioeconômicas da região (Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2017).

Culturas forrageiras de potencial regional

As plantas forrageiras, de modo geral, possuem alta capacidade de aproveitamento da energia solar, além do frequente cultivo em locais com características limitantes para outras culturas (Marsalis et al., 2010; Putnam e Orloff, 2014). A falta de informações acerca de espécies adaptadas limita as tomadas de decisões com o objetivo de reduzir os riscos de produção. Diante disso, diversos estudos (Jahanzad et al., 2013; Queiroz et al., 2018; Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2017) recomendam a utilização de fontes alternativas de forragens com características resilientes a condições ambientais extremas. Essas fontes alimentícias podem aperfeiçoar e maximizar os sistemas de produção local, sobretudo no período de escassez hídrica. A palma forrageira produz de quatro a cinco vezes mais matéria seca por milímetro de chuva do que qualquer outro tipo de planta, por causa do metabolismo ácido das crassuláceas (Degu et al., 2009; Taiz et al., 2017).

Outras culturas com características adaptativas da região (leguminosas, gramíneas e oleaginosas) apresentam-se como importantes alternativas para a minimização dos efeitos biogeoquímicos e aumento na dinâmica da matéria orgânica do solo. Logo, a alimentação combinada da palma com essas culturas proporciona alternativa com potencial de suprir as necessidades nutricionais e energéticas dos animais, principalmente no período de maior escassez hídrica, contribuindo com a mitigação do sistema produtivo da pecuária (Gusha et al., 2015; Medeiros et al., 2015).

Sorgo forrageiro

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é uma planta herbácea da família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Andropogoneae e gênero *Sorghum* (Pourhadian et al., 2019; Jardim et al., 2020a). A planta possui espículas hermafroditas, misturadas com masculinas em uma panícula terminal, sendo as glumas das espículas ovoides, tridentadas na ponta. Normalmente, é uma espécie com ciclo anual, têm colmos altos e espessos, cheios de uma seiva doce. As folhas apresentam formas lineares, compridas e largas, além de sistema radicular com raízes adventícias bem desenvolvidas e profundas (Figura 5) (Pereira e Cardoso, 1987).

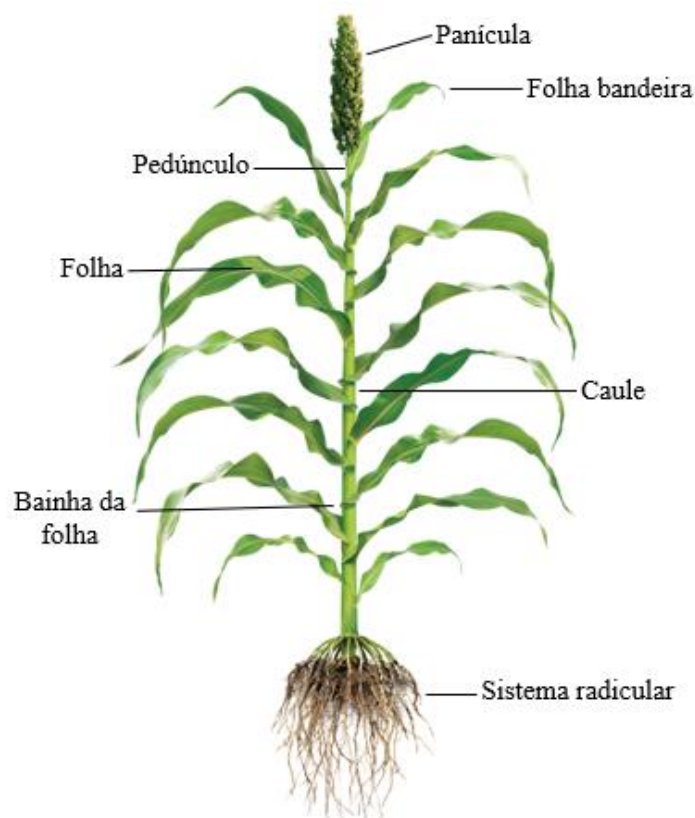


Figura 5. Características morfológicas da cultura do sorgo (*Sorghum bicolor* L.).

Além da importância nutricional, o sorgo tem alta eficiência no uso da água devido ao seu metabolismo fisiológico C₄. A cultura é amplamente utilizada para ração animal no semiárido brasileiro por ser fonte de energia e carboidratos, e também pela sua boa aceitabilidade e fácil digestibilidade (Taiz et al., 2017; Von et al., 2014).

O sorgo se destaca pelo bom rendimento produtivo, eficiente adaptabilidade a diversas condições de fertilidade do solo, tolerância a altas temperaturas do ar e condições hídricas deficitárias, sendo possível o cultivo em uma ampla faixa de altitudes. Tais características elevam a importância do sorgo (Pino e Heinrichs, 2017). Economicamente, o sorgo forrageiro é mais viável que outras plantas forrageiras, devido à menor necessidade de irrigação e fertilização (Bhat, 2019). Pino e Heinrichs (2017) ratificaram que, sob sistemas com lâminas limitadas de irrigação, o sorgo tem maior produtividade do que o milho. Além disso, o plantio do sorgo pode ser depois do milho, e algumas variedades têm maior capacidade de rebrota, o que permite outras colheitas dentro de uma única estação chuvosa.

O país que mais produz sorgo no mundo é os Estados Unidos da América, com média anual equivalente a 9,7 milhões de toneladas (Tabela 1), representando 15% de

toda produção global. No Brasil, a produção de sorgo é o equivalente a 3% da produção mundial, ou seja, cerca de 1,93 milhões de toneladas anuais.

Tabela 1. Principais países produtores de sorgo no mundo

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Média
	Milhões de toneladas								
Estados Unidos	8,78	5,41	6,29	9,97	10,99	15,16	12,20	9,24	9,75
Nigéria	7,14	5,69	5,84	5,30	6,88	7,01	7,56	6,94	6,54
México	6,94	6,43	6,97	6,31	8,39	5,20	5,01	4,85	6,26
Índia	6,70	7,00	5,98	5,28	5,54	5,45	4,24	4,57	5,60
Etiópia	3,96	3,95	3,60	3,83	4,34	4,77	4,75	4,82	4,25
Mundo	62,62	58,83	59,85	64,76	71,14	68,76	65,65	60,40	64,00
Brasil	1,53	1,93	2,02	2,13	2,28	2,14	1,15	2,22	1,92

Fonte: FAOSTAT (2019)

De acordo com dados da FAOSTAT (2019), aproximadamente 43 milhões de hectares são utilizados na plantação de sorgo. Deste total, 14,8% estão situadas na Índia, ou seja, 6,4 milhões de hectares (Figura 6). No Brasil, a área utilizada para cultivo de sorgo ainda é bem inferior às demais áreas utilizadas pelos principais produtores de sorgo no mundo. Em média, apenas 722 mil hectares são cultivados sorgo por ano no Brasil (Figura 6).

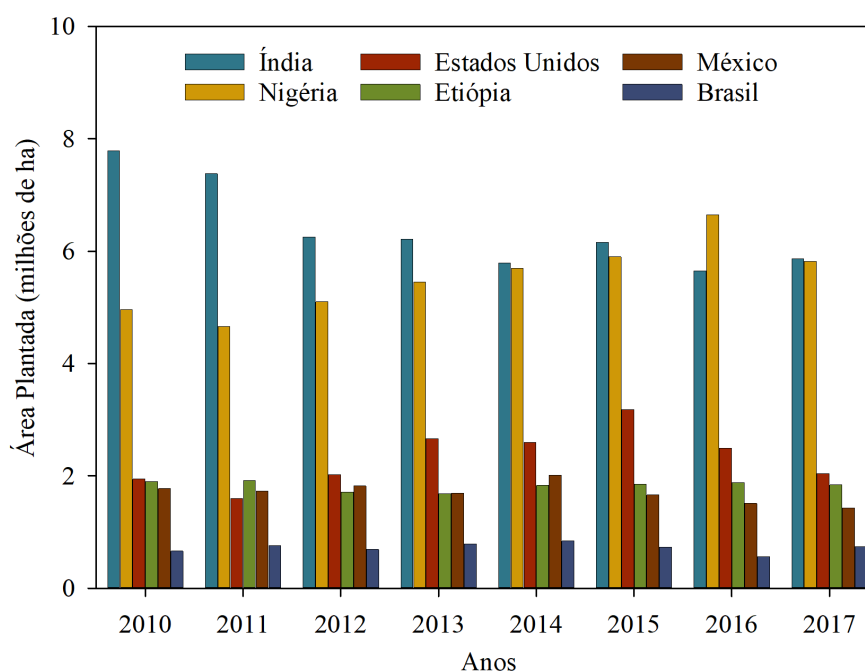


Figura 6. Área plantada de sorgo dos principais países produtores do mundo (Fonte: FAOSTAT, 2019).

No Brasil, o estado de Minas Gerais é o maior produtor de sorgo. De acordo com o Acompanhamento da Safra Brasileira de 2017/18 (CONAB, 2018), esse Estado respondeu por 34,3% da produção nacional (Tabela 2). Por sua vez, a região Centro-Oeste do país foi a que mais produziu sorgo na safra 2017/18, com parcela de 43% da produção nacional. A região do Sudeste evidenciou a maior produtividade do País (3,4 toneladas ha⁻¹) e, no Nordeste, a Bahia produziu 24,1 ton e 4,6% da produção regional e nacional nessa ordem.

Tabela 2. Levantamento da safra 2017/18 do sorgo no Brasil. Fonte: CONAB (2018)

Região	Área	Produção	Produtividade
	(mil ha)	(mil ton)	(kg ha ⁻¹)
Norte	32,7	53,9	1.651
TO	28,6	41,6	1.456
Nordeste	224,7	407,1	1.812
PI	16,5	8,5	514
RN	1,3	1,7	1.346
PB	1,2	2,0	1.700
BA	100,1	98,2	981
Centro-Oeste	295,1	891,6	3.022
MT	51,7	126,0	2.438
MS	7,0	24,5	3.500
GO	229,2	710,5	3.100
DF	7,2	30,6	4.250
Sudeste	220,7	758,2	3.436
MG	210,4	732,8	3.483
SP	10,3	25,4	2.470
Sul	9,0	25,0	2.777
RS	9,0	25,0	2.777
Brasil	782,2	2135,8	2.731

Milheto

O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) é uma planta de origem tropical, da família Poaceae, subfamília Panicoideae, gênero *Pennisetum* (Bruken, 1977). Esta cultura caracteriza-se pelo ciclo precoce, alta qualidade nutritiva e elevado potencial de produção. O milheto é uma excelente alternativa de resiliência para a regiões semiáridas em períodos

de escassez hídrica, podendo-se obter a colheita de grãos ou utilizá-lo como forragem suplementar (Kollet et al., 2006; Payne, 2000; Souza et al., 2019).

Esta cultura é caracterizada como uma gramínea de porte ereto, com ciclo anual entre 75 e 120 dias, variando de acordo com as condições ambientais. Normalmente, a cultura tem um rápido crescimento, com altura média de 1,5 a 3 m. A planta desenvolve panículas cilíndricas compactas de 2 a 3 cm de largura e 15 a 60 cm de comprimento, capazes de produzir de 500 a 2.000 sementes por panícula (Dias-Martins et al., 2018; Taylor, 2016).

Geralmente, o milheto apresenta colmos lisos, com diâmetro entre 1 e 2 cm, situados abaixo da panícula e que podem apresentar ramificações de segunda e terceira ordem a partir de gemas laterais dos nós. Em condições normais, o milheto produz uma abundante folhagem devido ao perfilhamento frequente (Durães et al., 2003). As folhas expõem comprimento e largura de até 100 e 80 cm, respectivamente, podendo ser lisas ou de superfícies e lígolas pilosas. A nervura pode ser proeminente ou não, tombada ou para cima. Podem ser encontrados estômatos em ambos os lados da superfície foliar, com densidade variando entre 50 e 80 mm m⁻² (Figura 7) (Durães et al., 2003).

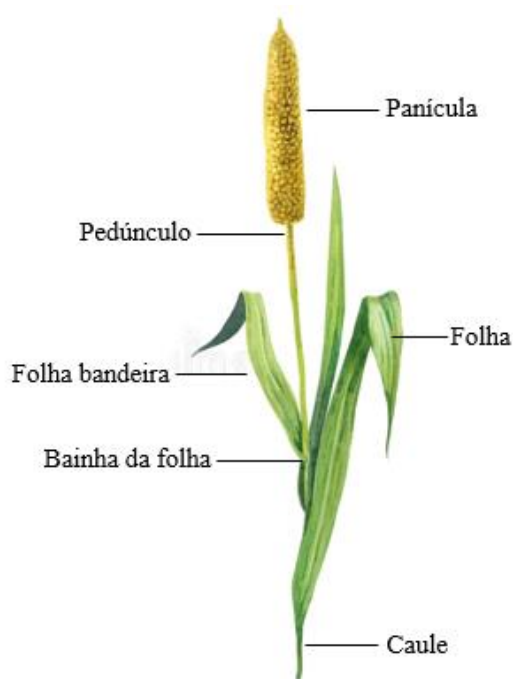


Figura 7. Características morfológicas da cultura do milheto (*Pennisetum glaucum* L.).

O surgimento das raízes ocorre nos nós inferiores da planta, sendo apenas uma raiz seminal com existência variando entre 45 e 60 dias. Já as raízes de segunda ordem se

desenvolvem no primeiro nó, constituindo-se por um par de radículas (Durães et al., 2003).

Quando comparado a culturas cereais, o milho expõe resistência ao déficit hídrico, solos com baixa fertilidade, elevada salinidade, altas temperaturas e baixo pH. Tais qualidades estão diretamente associadas ao seu extenso sistema radicular, que permite a absorção de água e nutrientes das camadas mais profundas do solo (Devi et al., 2014).

De acordo com a FAOSTAT (2019), os cinco principais países com maiores áreas de plantações de milho no mundo são Índia, Níger, Nigéria, China e Mali (Figura 8). A Índia planta, em média, 9,9 milhões de hectares por ano, equivalente a 30% de toda área cultivada com Milho no mundo. Todavia, no período compreendido entre os anos 2010 e 2017, percebe-se redução de 16,5% das áreas plantadas nos principais países produtores de milho (FAOSTAT, 2019) (Figura 8)

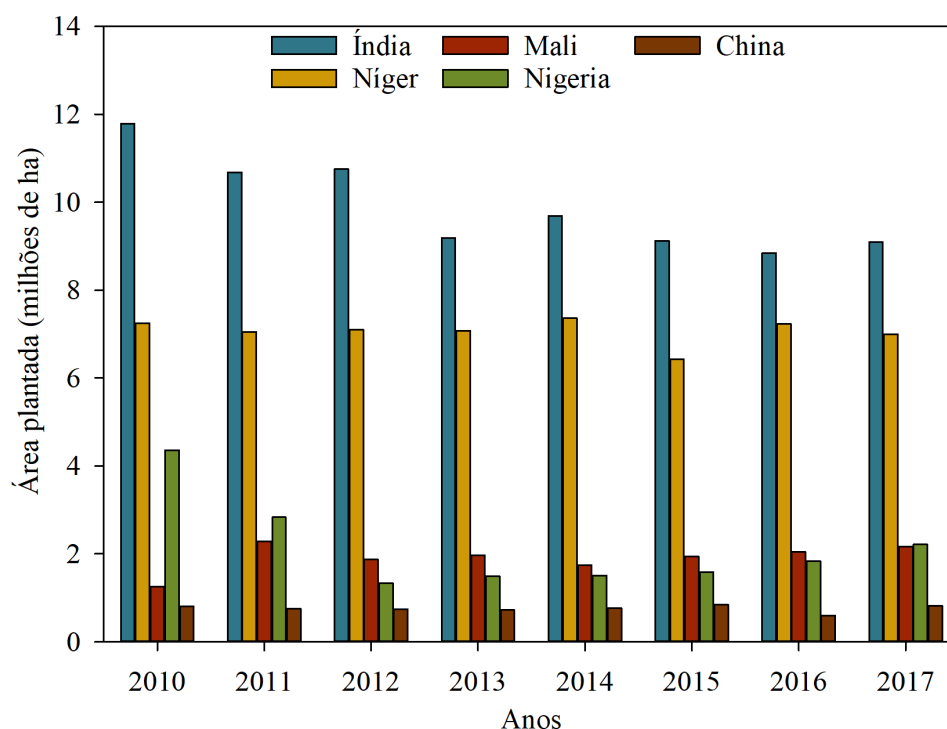


Figura 8. Área plantada de milho com os principais países produtores do mundo (Fonte: FAOSTAT, 2019).

No cenário de produção agrícola mundial (Tabela 3), a Índia destaca-se como o maior produtor, responsável por aproximadamente 40,4% de toda produção de Milho no mundo, seguido por Níger (12,1%), Nigéria (6,4%), China (6,3%), Mali (5,9%), além da soma produtivas dos outros países (28,9%) (FAOSTAT, 2019).

Tabela 3. Principais países produtores de milho no mundo

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Média
	Milhões de toneladas								
Índia	13,29	12,66	10,75	10,91	11,42	11,63	10,28	11,56	11,56
Níger	3,84	2,76	3,86	2,92	3,32	3,40	3,89	3,79	3,47
Nigéria	5,17	1,27	1,28	0,91	1,40	1,49	1,55	1,50	1,82
China	1,57	1,57	1,80	1,75	2,34	1,97	1,39	2,00	1,80
Mali	1,37	1,46	1,68	1,85	1,72	1,86	1,81	1,81	1,70
Mundo	32,80	27,05	26,64	26,43	28,45	30,18	29,05	28,46	28,63

Fonte: FAOSTAT (2019).

Feijão-guandu

O feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp.) é uma leguminosa que se originou na região Norte da Índia (Khoury et al., 2015). A planta desenvolve-se bem sob as condições climáticas brasileiras, desde a região Sul até o Nordeste (Amabila et al, 2008). Possui vários nomes culturais pelo Brasil, como: guandu, guando, gandu, andu, entre outros. Em outras regiões do mundo pode ser nomeado por pigeon pea (inglês), tur e arhar (hindi), gandul (espanhol), poid d'Angole e Poid de Congo (francês) (Pal et al., 2011; Sewsaran et al., 2019).

Morfologicamente, o feijão-guandu apresenta caule com característica lenhosa e raiz pivotante, com comprimento que superam um metro. Essa planta pode exibir raízes secundárias situadas nos primeiros 30cm do solo e nódulos com bactérias do gênero *Rhizobium* que fixam nitrogênio por meio simbiótico (Figura 9) (Seiffert e Thiago, 1983), logo, melhora a fertilidade do solo (Khoury et al., 2015).

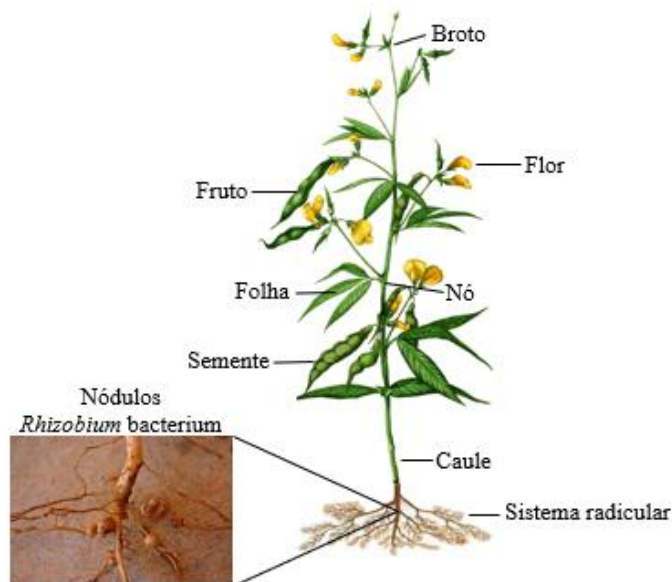


Figura 9. Características morfológicas da cultura do feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp.).

Mediante as características supracitadas, o feijão-guandu é amplamente cultivado em sistema de consórcio com outras culturas, pois minimiza a competição por nutrientes. É amplamente empregado em configurações de consórcios com cereais como, milho e sorgo. Upadhaaya et al. (2014) citam que as plantas de feijão-guandu fixam em torno de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio, além de adicionarem matéria orgânica ao solo através da queda de folhas com quantitativo de até 3,1 ton ha⁻¹.

Normalmente, o feijão-guandu é cultivado por pequenos agricultores no início do período chuvoso, oferecendo boa adaptação a diversos sistemas produtivos, como: plantio direto, convencional e consorciado com outras culturas. É usado ainda na alimentação animal sob forma de componente de mistura de silagem, forragem verde e feno (Godoy et al., 2003; Wenwer, 1979). Subbarao et al. (2000) afirmam que o feijão-guandu é mais resistente a elevadas temperaturas e condições hídricas do que a maioria das leguminosas, que se deve ao ajuste osmótico foliar, o que mantém processos fotossintéticos ativos mesmo em condições estressantes (Subbarao et al., 2000; Lopez et al., 1987).

A maturação completa é a principal característica de seleção para esta cultura (Mligo e Craufurd, 2005). Já a maturação precoce é uma característica adaptativa e adequada a condições climáticas de baixa pluviosidade e para solos com baixa retenção de umidade. As cultivares de maturação tardia são eficientes na tolerância a condições adversas, como estresse hídrico e térmico. Summerfield e Lawn (1987) enaltecem que

ciclos mais longos favorecem a recuperação dos estresses adversos, devido ao maior tempo e plasticidade fenológica da cultura.

Em termos de produção do feijão-guandu, anualmente cerca de 4,41 milhões de toneladas são colhidas no mundo. A Índia se destaca como o maior produtor, com média de 3 milhões de toneladas anuais, representando 69% da produção mundial (Tabela 4).

Tabela 4. Principais países produtores de feijão guandu no mundo

Países	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Média
	Milhões de toneladas								
Índia	2,46	2,86	2,65	3,02	3,17	2,81	2,56	4,87	3,05
Myanmar	0,82	0,58	0,55	0,58	0,58	0,60	0,63	0,80	0,64
Malawi	0,19	0,22	0,24	0,29	0,32	0,34	0,37	0,47	0,30
Tanzânia	0,17	0,27	0,21	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,24
Haiti	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09	0,11	0,11	0,12	0,09
Mundo	3,79	4,08	3,80	4,30	4,48	4,19	4,01	6,60	4,41

Fonte: FAOSTAT (2019)

Girassol Forrageiro

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma cultura dicotiledônea anual, pertence à família Asteraceae, e tem origem na América do Norte (Sinha et al., 2017). É uma das principais oleaginosas do mundo, contribuindo com 8% no mercado mundial de oleaginosas (USDA, 2017).

O girassol contém aproximadamente 45% de óleo e 18,5% de proteína, apresentando potencial na produção de óleo comestível e ração animal (Hussain et al., 2018). É uma cultura adaptada a regiões tropicais e subtropicais, com climas árido e semiárido, e que, geralmente, são cultivadas em condições de sequeiro ou com irrigações complementares (Robert et al., 2016).

Morfologicamente, essa cultura apresenta sistema radicular bem desenvolvido, podendo atingir até 4 metros de profundidade, com a raiz pivotante, e 50 centímetros de diâmetro, com suas raízes laterais (Figura 10), sendo que o desenvolvimento do sistema radicular é mais rápido em comparação ao desenvolvimento das folhas. Normalmente, o número de folhas é uma característica genética e é ligeiramente afetado por fatores ambientais. A inflorescência é composta por flores sésseis anexadas em um receptáculo

comum em discoide e rodeada por um involúcro de brácteas, surgindo da extremidade superior do caule (Figura 10), denominado de capítulo (Alberio et al., 2015).

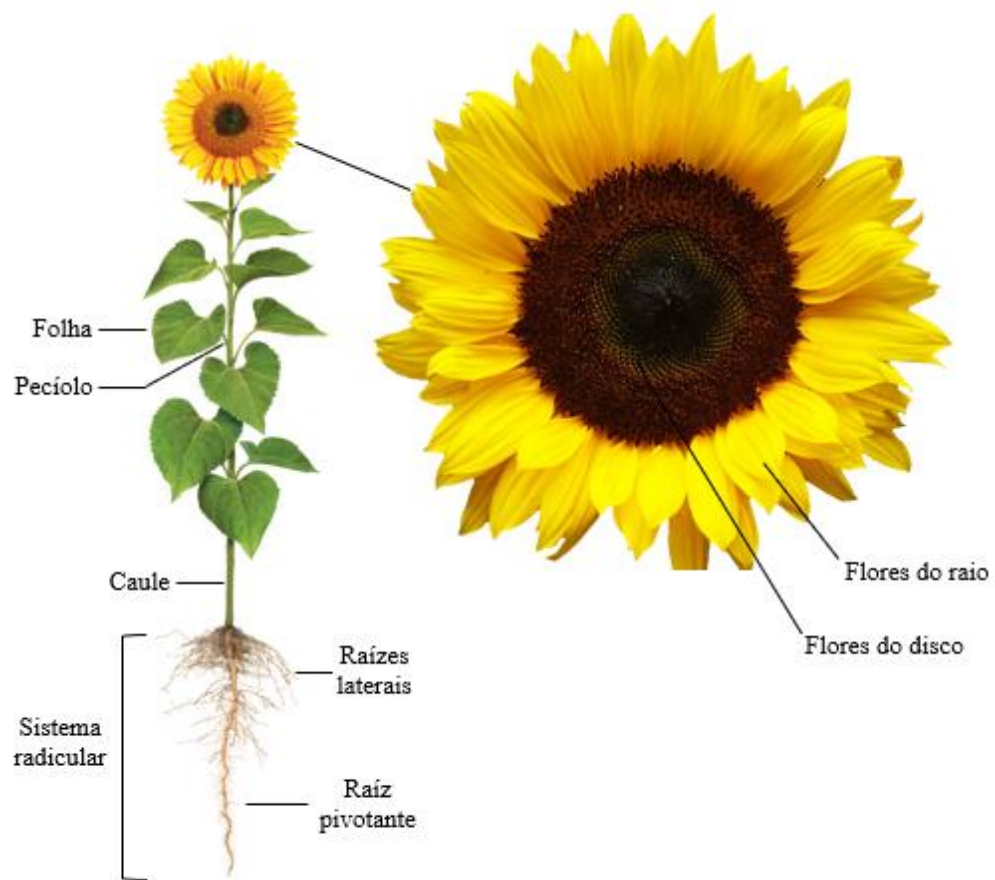


Figura 10. Características morfológicas da cultura do girassol (*Helianthus annuus* L.).

O girassol é uma cultura de metabolismo C_3 , apresentando suas folhas, os botões apicais e as inflorescências em desenvolvimento como diaheliotrópicos, ou seja, altera sua posição e que, normalmente, se volta para o sol ao longo do dia. À noite, os órgãos do girassol sofrem movimento não mediado pela luz, reorientando-se para a posição leste ao amanhecer (Vandenbrink et al., 2014).

Os maiores produtores mundiais são a Rússia, Ucrânia, União Europeia e Argentina (USDA, 2018). O Brasil registra uma produção média anual de aproximadamente 104,1 mil toneladas, a partir de uma área média equivalente a 71,8 mil hectares por ano, obtendo produtividade média de $1,45 \text{ ton ha}^{-1}$ (Figura 11) (CONAB, 2020). Como evidenciado na Figura 11, houve pouca alteração na produção e abrangência de área cultivada com girassol ao longo do período 2000-2019, com aproximadamente 7,7 e 7,6%, respectivamente.

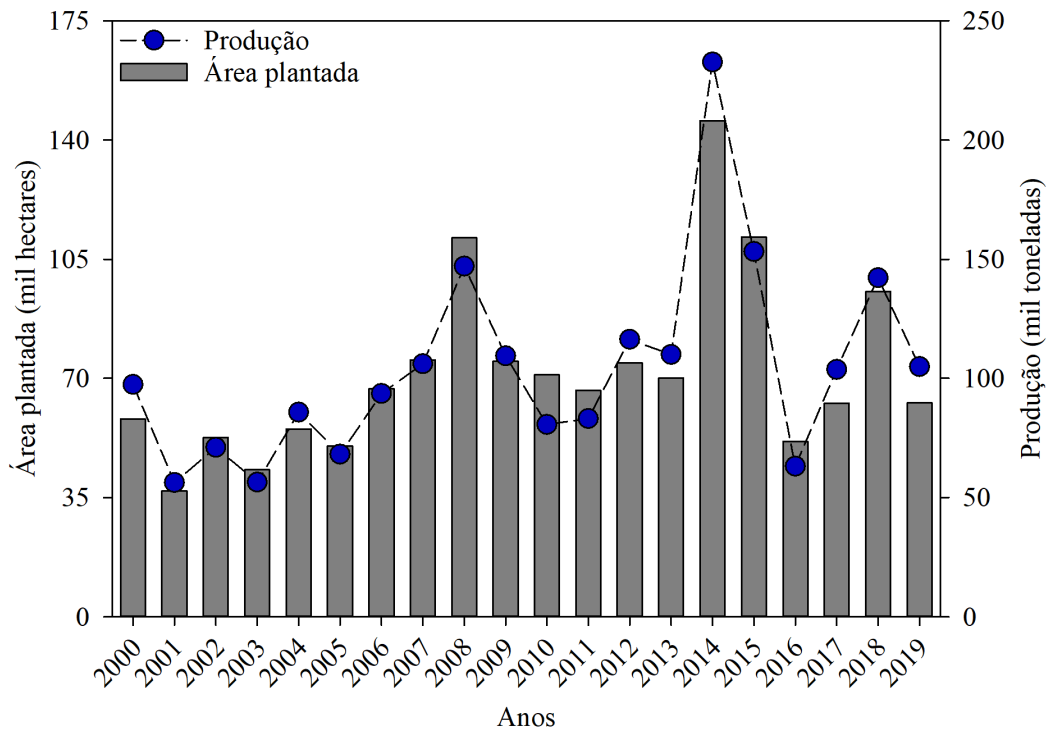


Figura 11. Média histórica da área plantada e produção do girassol no Brasil.

O Estado do Mato Grosso é o maior produtor brasileiro, com aproximadamente 50% da produção nacional e produtividade 2,2% superior à produtividade média do Brasil (CONAB, 2020).

Palma forrageira

A palma forrageira tem origem na América tropical e subtropical, pertence ao Reino: Plantae; Divisão: Embryophyta; Subdivisão: Angiospermea; Classe: Dicotyledoneae; Ordem: Opuntiales; Família: Cactaceae (Taguchi et al., 2017; Jardim et al., 2020b). No semiárido brasileiro, os clones de palma dos gêneros *Opuntia* sp. e *Nopalea* sp. são os mais cultivados. A seleção desses clones ocorre pela sua resistência à cochonilha-do-carmim (*Dactylopius opuntiae*), considerada como sua principal praga (Barbosa et al., 2018; Queiroz et al., 2015; Silva et al., 2015).

Morfologicamente, caracteriza-se como uma planta arbustiva ou arbórea, podendo atingir até 6,0 m de altura. Geralmente, apresenta cladódios achatados e em formato elíptico, com comprimento entre 20 - 50 cm e largura entre 20 - 30 cm, espessura com aproximadamente 2 cm, coloração verde e uma fina camada cerosa (minimizando a perda hídrica por transpiração e aumentando a proteção contra organismos patógenos), além de aréolas localizadas entre 2 - 5 cm de distância (Figura 12A). A planta possui sistema

radicular bem desenvolvido, atingindo profundidade máxima em torno dos 30 cm, mas podendo espalhar-se por até 8 m. Apresenta raízes de rápida absorção de água disponível, além de restrição da superfície radicular e diminuição de sua permeabilidade à água, quando não há disponibilidade hídrica no solo, afim de evitar as perdas de água para o solo seco (Taguchi et al., 2017).

Por se tratar de uma cactácea, a palma forrageira apresenta características fisiológicas que lhe permitem pleno desenvolvimento vegetativo em regiões áridas e semiáridas, devido ao metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) (Niechayev et al., 2019; Yahia e Sáenz, 2011; Nobel, 1995). As culturas de metabolismo MAC são fotossinteticamente adaptadas a condições ambientais, cuja disponibilidade hídrica sazonal, com características que minimizam as perdas de água, como quantidade resumida de estômatos e com pequenas aberturas, grandes vacúolos e cutículas grossas (Niechayev et al., 2019; Taiz et al., 2017).

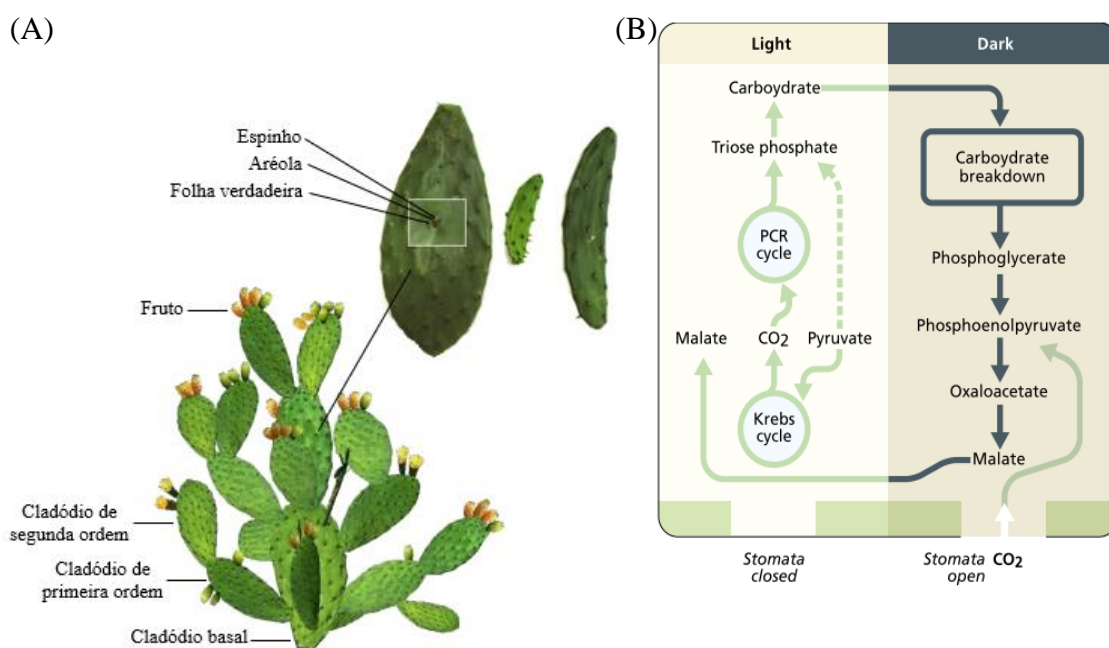


Figura 12. Características da palma forrageira, desde seus aspectos morfológicos (A), e ilustração do seu metabolismo ácido das crassuláceas (B). Adaptado de Taguchi et al. (2017).

As plantas MAC iniciam o processo de abertura dos estômatos somente à noite, quando o déficit de pressão de vapor é mais baixo, proporcionando a fixação de CO_2 atmosférico em ácidos de quatro carbonos e posterior armazenamento nos vacúolos (Figura 12B). Durante o dia os estômatos se fecham, ocorrendo a descarboxilação e conversão do malato em carboidratos (açúcares, polissacarídeos ou amido). Esse processo fisiológico proporciona maior eficiência no uso da água e minimiza as perdas por transpiração (Cushman, 2017; Taiz et al., 2017).

Tais características permitem a essa cactácea, além da adaptação a ambientes secos, maior capacidade de conversão dos recursos naturais em acúmulo de biomassa. Com eficiência na produção cinco vezes maior que plantas com metabolismo C_3 e três vezes maior que plantas C_4 , alcançando valores entre 100 e 150 kg de água por kg de matéria seca (Cano et al., 2017; Iqbal et al., 2020; Jardim et al., 2020c).

Paiva et al. (2016) afirmam que os perfis bioativos da palma mudam de acordo com a espécie, as cultivares e as condições climáticas existentes. Quando submetidas a ambientes com condições hídricas não limitantes, a palma, assim como a maioria das plantas MAC, pode alterar seu desenvolvimento metabólico a níveis mais semelhantes às apresentadas pelas plantas com metabolismo C_3 (Figura 13), processo definido como MAC facultativa (Niechayev et al., 2019).

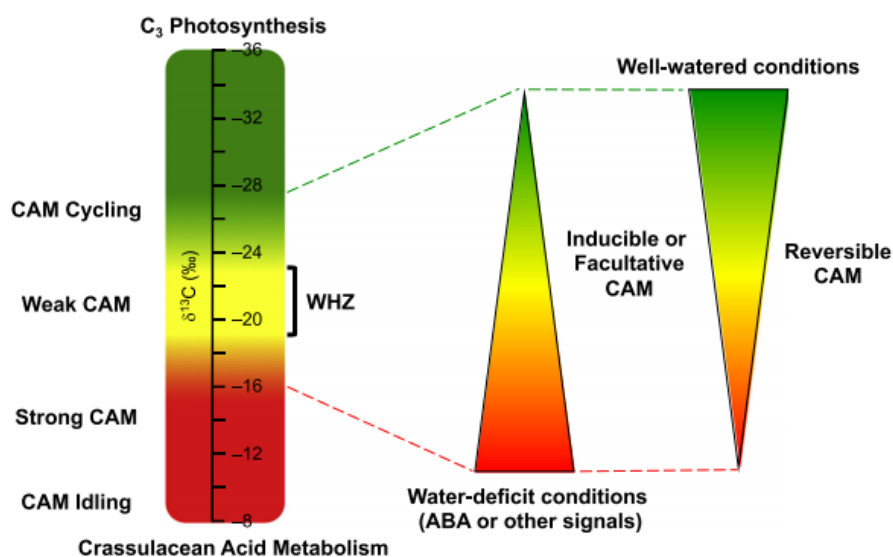


Figura 13. Distribuição da fotossíntese do metabolismo C_3 ao metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) ao longo de um gradiente contínuo derivado de pesquisas em larga escala dos valores de $\delta^{13}C$ (‰) (Fonte: Cushman, 2017).

Mediante essas características, o cultivo da palma no semiárido representa uma importante alternativa para aumento do rendimento de biomassa com baixos custos de produção, devido a sua alta eficiência no uso da água e nutrientes, alto conteúdo de água nos cladódios (85-90%) e rápido estabelecimento (Moraes et al., 2019; Silva et al., 2017). Essas características tornam a palma tolerante a ambientes com elevado déficit hídrico e condições climáticas irregulares (Iqbal et al., 2020).

No Brasil, a área de produção é de aproximadamente 500.000 ha, distribuídos pelos estados nordestinos da Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará. A maior parte da produção é destinada à alimentação animal, produzida por pequenos agricultores familiares (Taguchi et al., 2017).

O manejo agrícola e as condições ambientais influenciam diretamente nas características de desenvolvimento da palma forrageira. Seus cladódios são capazes de manter uma pequena taxa de crescimento mesmo em condições hídricas muito baixas, aumentando rapidamente com a elevação da umidade do solo, evidenciando-se a importância da agricultura irrigada (Scalisi et al., 2016), com disponibilidades pluviométricas ideais entre 1048 e 1096 mm ano⁻¹ para elevadas produções (Queiroz et al., 2015). No entanto, altas produções de palma forrageira podem ser alcançadas com lâminas de irrigações de 40 a 50% da ET₀ (Castro et al., 2020).

As diferentes intensidades de corte afetam o rendimento final da palma forrageira. Os cortes com a manutenção dos cladódios primário e/ou secundários proporcionam maiores produtividades e eficiência do uso da água que os cortes preservando apenas o cladódio basal (Pereira et al., 2020). Além destes, fatores como a adubação, espaçamento entre plantas (Lédo et al., 2019; Vazquez Mendoza et al., 2019), salinidade da água de irrigação (Fonseca et al., 2019), também são citados como condicionantes do desenvolvimento da palma forrageira.

Lacunas entre níveis de produtividade “Yield Gap”

A ampliação sustentável dos sistemas agrícolas, com o propósito de aumentar a produtividade das culturas nas terras agrícolas disponíveis, tem-se caracterizado como uma das mais viáveis e eficientes formas de satisfazer à demanda futura de alimentos no mundo (Beza et al., 2017; Godfray et al., 2010; Visses et al., 2018). Diferentes conceitos e metodologias foram desenvolvidos a fim de elucidar as quebras de produtividade considerando o potencial climático e biológico das culturas, e as reais produtividades obtidas pelos agricultores (Silva et al., 2017).

O termo “*Yield Gap*” é mundialmente adotado, fundamentando-se nos distintos modelos ecológicos de produção e sua estimativa pode ser obtida pela diferença entre uma medida potencial de referência e a produtividade real. Sua análise comporta uma base de dados na identificação de magnitudes e principais fatores que influenciam na produtividade das culturas agrícolas, proporcionando valiosas informações na definição das estratégias para a segurança alimentar e energética (Lobell et al., 2009; Pourhadian et al., 2019; Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum e Rabbinge, 1997; Van Ittersum et al., 2013; Zu et al., 2018).

Atualmente existem diversos estudos na literatura mundial sobre “*Yield Gap*”. Tais publicações apresentam divergências nos conceitos acerca da estimativa dos déficits de

produtividades agrícolas (Fischer, 2015). Logo, diferentes conceitos sobre os níveis específicos de produtividade são adotados. Lobell et al. (2009) estabeleceram quatro níveis de produtividades, a mais alta como potencial, seguida das obtidas em experimentos e as produtividades máximas e médias obtidas pelos agricultores.

Outros estudos classificam as produtividades em três níveis, sendo o maior caracterizado como a potencial, e consecutivamente, as atingíveis e reais obtidas pelos agricultores. Esses estudos analisaram a diferença entre a produtividade potencial (PP) e a atingível (PA), caracterizadas como valores de referência, que resultam no déficit de produtividade pela insuficiência hídrica. Já com a diferença entre a PA e a produtividade real dos agricultores (PR) para condições de sequeiro é possível identificar a lacuna de produtividade mediante o manejo abaixo dos valores ideais (Battisti et al., 2018; Bhatia et al., 2008; Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2015; Zu et al., 2018). Por outro lado, Li-Guo et al. (2018) limitaram em apenas dois níveis de produtividades, a atingível e a real obtida pelos agricultores.

Apesar das distinções sobre esses conceitos, é de consenso geral a ideia de que a maior produtividade é a potencial, cujo valor é teórico, observando-se as características envolvidas em condições reais de campo (Figura 14). De modo geral, a Produtividade Potencial (PP) é atingível pela cultura na ausência de fatores limitantes como hídricos, nutricionais e sem a interferência de pragas, ervas daninhas ou doenças, limitando-se a fatores climáticos (radiação solar, temperatura e fotoperíodo) juntamente com as características dos genótipos das plantas e o adensamento do cultivo (Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013; Zu et al., 2018).

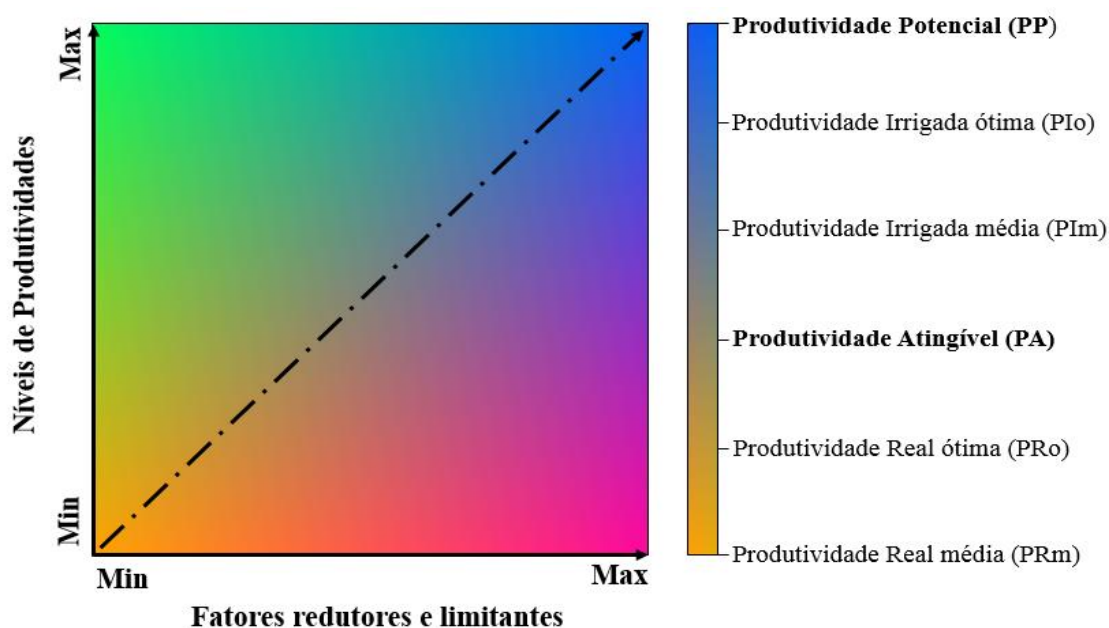


Figura 14. Níveis de produtividade agrícola mediante fatores agroclimáticos. Adaptado: Sentelhas et al. (2015); Van Ittersum et al. (2013).

A estimativa ou determinação da PP (Figura 14) pode ser realizada a partir de pesquisas experimentais em campo, cujos fatores hídricos sejam ideais e haja total controle do manejo da cultura, ou mediante uso de modelos de simulação adequadamente calibrados, considerando-se um manejo e condições climáticas ideais para o total desenvolvimento da espécie (Lobell et al., 2009; Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013; Zhang et al., 2019).

Para as culturas cujas necessidades hídricas são supridas mediante o uso de irrigação total ou complementar, obtém-se o nível de Produtividade Irrigada (PI) com nível inferior a potencial (Figura 14). A Produtividade Irrigada (PI) pode destacar-se como um nível de produtividade maior, considerado como a Produtividade Irrigada Ótima (PIo), quando a lâmina de irrigação é aplicada com a máxima eficiência possível a fim de se atender as necessidades hídricas da cultura, ou um rendimento menor. Já a Produtividade Irrigada Média (PI_m) é verificada quando as necessidades hídricas da cultura não são supridas pelo manejo de irrigação (Sentelhas et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013).

A Produtividade Atingível (PA) é influenciada por fatores limitantes, como déficit hídrico e nutricional. Este nível de produtividade é alcançado apenas em condições ideais de fitossanidade, ou seja, sem que fatores redutores como doenças, pragas e ervas daninhas que influenciam no crescimento e desenvolvimento da cultura ao longo de seu ciclo (Dias e Sentelhas, 2018; Zu et al., 2018).

De acordo com os diferentes níveis de produtividade expostos (Figura 14), Sentelhas et al. (2015) destacam a Produtividade Real (PR) como a de menor magnitude, sendo afetada diretamente por fatores ambientais, biológicos, de genótipos e manejo agrícola. Tal cenário é característico dos cultivos em condições de sequeiro, em que há limitações hídricas e conseqüentemente nutricionais. A PR divide-se em dois níveis: a Produtividade Real Ótima (PRo), onde há melhores condições de manejos agrícolas, e a Produtividade Real Média (PR_m), caracterizada por apresentar a produtividade média obtida por pequenos agricultores em função das limitações tecnológicas e manejo agrícola (Sentelhas et al., 2015). Beza et al. (2017) ressaltaram que a análise de *Yield Gap* é de importância primária na identificação dos principais déficits de produtividades em diversos cenários mundiais (climáticos, biológicos, econômicos, etc.). Todavia, exige-se a aquisição, de forma eficiente, de dados com alto nível de detalhamento objetivando-se aperfeiçoar o estudo.

A análise de *Yield Gap* apresenta-se como importante ferramenta na constatação dos principais fatores limitantes dos rendimentos das colheitas (Rong et al., 2021). A partir dessa análise, alguns estudos constataram que a fertilização excessiva reduz a eficiência de absorção de nutrientes (Chen et al., 2018; Cui et al., 2014). Bai et al. (2020) constatou que o aumento da irrigação e a densidade de plantio constituem-se com alternativas eficientes na utilização de fertilizantes de Nitrogênio. Também foi possível verificar que é possível aumentar a eficiência do uso da água com a adoção do plantio direto e cobertura morta, melhorando a estrutura do solo (Kan et al., 2020; Peng et al., 2020).

Trabalhos com a análise de *Yield Gap* para plantas forrageiras são reduzidos e com informações limitadas (Chen et al., 2018; Paepe e Álvarez, 2016; Insua et al., 2021). Fato que proporciona imprecisão na estimativa dos níveis de produção agrícola potencial e atingível, condicionando tais resultados a aplicações locais e, consecutivamente, restringindo sua utilização. Portanto, a intensificação de estudos sobre essa análise em plantas forrageiras possibilitará o aumento da precisão e padronização nas respostas produtivas para culturas forrageiras, manejos agrícolas e condições climáticas, ampliando sua aplicação para escala regional de forma mais eficiente e precisa.

Considerações finais

Nesta revisão as características ambientais do semiárido e de espécies forrageira resilientes. Também, os conceitos importantes na análise das lacunas de produção de espécies vegetais foram abordados. Estas informações podem ser úteis na ampliação da disponibilidade de forragem ao longo do ano, logo que, o uso de espécies resilientes representa uma estratégia importante para contornar a variação sazonal de forragem nestas áreas, permitindo uma maior estabilidade de produção. Os resultados desta pesquisa demonstram ainda que, a análise de *Yield Gap* para culturas forrageiras é incipiente e deve ser encorajada com vistas a subsidiar melhorias no planejamento e potencialização da disponibilidade de forragem em ambientes semiáridos.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE (processos: APQ-0215-5.01/10 e FACEPE - APQ-1159-1.07/14). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos:

475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286 / 2015-3, 309421/2018-7 e 152251/2018-9). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES (Código Financeiro 001) pela bolsa de pesquisa e estudo.

Referências

- Alberio, C., Izquierdo, N. G., Aguirrezábal, L. A. N. (2015). Sunflower Crop Physiology and Agronomy. In *Sunflower*, 1981, p. 53–91. <https://doi.org/10.1016/B978-1-893997-94-3.50009-X>
- Almeida, C. L., Carvalho, T. R. A., Araújo, J. C. (2019). Leaf area index of Caatinga biome and its relationship with hydrological and spectral variables. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279(March), 107705. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107705>
- Althoff, T. D., Menezes, R. S. C., Carvalho A. L., Pinto, A. S., Santiago, G. A. C. F., Ometto, J. P. H. B., Randow, C., Sampaio, E. V. S. B. (2016). Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 360, 367–375. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.001>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Alves, M., Alejandro, F., Souza, A. Sergio, C. (2015). Dendrochronologia Influence of regional rainfall and Atlantic sea surface temperature on tree-ring growth of *Poincianella pyramidalis*, semiarid forest from Brazil. *Dendrochronologia*, 35, 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.007>
- Bai, Y., Zha, T., Bourque, C. P. A., Jia, X., Ma, J., Liu, P., Yang, R., Li, C., Du, T., Wu, Y. (2020). Variation in ecosystem water use efficiency along a southwest-to-northeast aridity gradient in China. *Ecological Indicators*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105932>
- Barbosa, M. L., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S., Steidle Neto, A. J. (2018). The Influence of cladode morphology on the canopy formation of forage cactus plants. *Revista Caatinga*, 31(1), 180–190. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n121rc>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pascoalino, J. A. L., Sako, H., Dantas, J. P. S., Moraes, M. F. (2018). Soybean Yield Gap in the Areas of Yield Contest in Brazil. *International*

- Journal of Plant Production*, 12(3), 159–168. <https://doi.org/10.1007/s42106-018-0016-0>
- Bell, L. W., Moore, A. D., Thomas, D. T. (2018). Integrating diverse forage sources reduces feed gaps on mixed crop-livestock farms. *Animal*, 12(9), 1967–1980. <https://doi.org/10.1017/S1751731117003196>
- Beza, E., Silva, J. V., Kooistra, L., Reidsma, P. (2017). Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy*, 82, 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.016>
- Bhat, B. V. (2019). Breeding Forage Sorghum. In *Breeding Sorghum for Diverse End Uses* (Número 1992, p. 175–191). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101879-8.00011-5>
- Bhatia, V. S., Singh, P., Wani, S. P., Chauhan, G. S., Rao, A. V. R. K., Mishra, A. K., Srinivas, K. (2008). Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8–9), 1252–1265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.004>
- Cano, M. P., Gómez-Maqueo, A., García-Cayuela, T., Welti-Chanes, J. (2017). Characterization of carotenoid profile of Spanish Sanguinos and Verdal prickly pear (*Opuntia ficus-indica*, spp.) tissues. *Food Chemistry*, 237, 612–622. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.135>
- Cardoso, D. B., Carvalho, F. F. R., Medeiros, G. R., Guim, A., Cabral, A. M. D., Vêras, R. M. L., Santos, K. C., Dantas, L. C. N., Nascimento, A. G. O. (2019). Levels of inclusion of spineless cactus (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) in the diet of lambs. *Animal Feed Science and Technology*, 247, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.10.016>
- Carvalho, A. A., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Moura, M. S. B., Araujo, G. G. L., Tolêdo, M. P. S. (2017). Soil moisture in forage cactus plantations with improvement practices for their resilience. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(7), 481–487. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p481-487>
- Castro, I. N., Santos, S. R., Kondo, M. K., Maia, V. M., Santos, C. C. R. (2020). Agronomic performance and water use efficiency of irrigated cactus pear cultivars. *Revista Caatinga*, 33(2), 529–540. <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n225rc>
- Chen, G., Cao, H., Liang, J., Ma, W., Guo, L., Zhang, S., Jiang, R., Zhang, H., Goulding, K. W. T., Zhang, F. (2018). Factors affecting nitrogen use efficiency and grain yield of summer maize on smallholder farms in the North China Plain. *Sustainability (Switzerland)*, 10(2), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su10020363>

- Costa, R. G., Beltrão Filho, E. M., Medeiros, A. N., Givisiez, P. E. N., Queiroga, R. C. R. E., Melo, A. A. S. (2009). Effects of increasing levels of cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. Miller) in the diet of dairy goats and its contribution as a source of water. *Small Ruminant Research*, 82(1), 62–65. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2009.01.004>
- Cui, Z., Wang, G., Yue, S., Wu, L., Zhang, W., Zhang, F., Chen, X. (2014). *Closing the N-Use Efficiency Gap to Achieve Food and Environmental Security*. <https://doi.org/10.1021/es5007127>
- Cushman, J. (2017). CAM Plants. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (Vol. 1, p. 60–77). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394807-6.00092-7>
- Degu, A., Melaku, S., Berhane, G. (2009). Supplementation of isonitrogenous oil seed cakes in cactus (*Opuntia ficus-indica*)-tef straw (*Eragrostis tef*) based feeding of Tigray Highland sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 148(2–4), 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2008.03.014>
- Devi, P. B., Vijayabharathi, R., Sathyabama, S., Malleshi, N. G., Priyadarisini, V. B. (2014). Health benefits of finger millet (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fiber: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(6), 1021–1040. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0584-9>
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. (2018). Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>
- Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L. F., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023>
- Diniz, W. J. S., Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. S., Santos, D. C., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724–733. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900004>
- Durães, F. O. M., Magalhães, P. C., Santos, F. G. (2003). *Fisiologia da Planta de Milheto* 28. 1–16. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/487540/1/Circ28.pdf>
- Fischer, R. A. (2015). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.006>
- Fonseca, V. A., Santos, M. R., Silva, J. A., Donato, S. L. R., Rodrigues, C. S., Brito, C. F.

- B. (2019). Morpho-physiology, yield, and water-use efficiency of *Opuntia ficus-indica* irrigated with saline water. *Acta Scientiarum. Agronomy*, *41*(1), 42631. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v41i1.42631>
- Garcia-Franco, N., Hobbey, E., Hübner, R., Wiesmeier, M. (2018). Climate-Smart Soil Management in Semiarid Regions. In *Soil Management and Climate Change* (p. 349–368). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812128-3.00023-9>
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S. M., Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science (New York, N.Y.)*, *327*(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
- Godoy, R., Batista, L. A. R., Souza, F. H. D., Primavesi, A. C. (2003). Caracterização de Linhagens Puras Seleccionadas de Guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp) (1) Description of Selected Pigeon-pea (*Cajanus cajan* (L.) Mill sp) Pure Lines. *Revista Brasileira de Zootecnia*, *32*(1), 546–555.
- Gusha, J., Halimani, T. E., Katsande, S., Zvinorova, P. I. (2015). The effect of *Opuntia ficus indica* and forage legumes based diets on goat productivity in smallholder sector in Zimbabwe. *Small Ruminant Research*, *125*, 21–25. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2015.02.018>
- Hussain, M., Farooq, S., Hasan, W., Ul-Allah, S., Tanveer, M., Farooq, M., Nawaz, A. (2018). Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, *201*, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.028>
- Insua, J. R., Machado, C. F., Garcia, S. C., Berone, G. D. (2021). Forage yield gap analysis for tall fescue pastures in Argentina: A modelling approach. *Grass and Forage Science*, *76*(2), 245–257. <https://doi.org/10.1111/gfs.12508>
- Iqbal, M. A., Hamid, A., Imtiaz, H., Rizwan, M., Imran, M., Sheikh, U. A. A., Saira, I. (2020). Cactus Pear: a Weed of Dry-Lands for Supplementing Food Security Under Changing Climate. *Planta Daninha*, *38*. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582020380100040>
- Jahanzad, E., Jorat, M., Moghadam, H., Sadeghpour, A., Chaichi, M.-R., Dashtaki, M. (2013). Response of a new and a commonly grown forage sorghum cultivar to limited irrigation and planting density. *Agricultural Water Management*, *117*, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.001>
- Kan, Z. R., Liu, Q. Y., He, C., Jing, Z. H., Virk, A. L., Qi, J. Y., Zhao, X., Zhang, H. L. (2020). Responses of grain yield and water use efficiency of winter wheat to tillage in

- the North China Plain. *Field Crops Research*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107760>
- Khoury, C. K., Castañeda-Alvarez, N. P., Achicanoy, H. A., Sosa, C. C., Bernau, V., Kassa, T., Norton, S. L., Jos, L., Van Der Maesen, G., Upadhyaya, H. D., Ramírez-Villegas, J., Jarvis, A., Struik, P. C. (2015). Crop wild relatives of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.]: Distributions, ex situ conservation status, and potential genetic resources for abiotic stress tolerance. *Biological Conservation*, 184, 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.01.032>
- Kollet, J. L., Mauro, J., Leite, G. G. (2006). Rendimento forrageiro e composição bromatológica de variedades de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.) 1 Forage yield and chemical composition of pearl millet varieties (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 1308–1315.
- Lal, R. (2004). Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems. *Environmental Management*, 33(4), 528–544. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9110-9>
- Lédo, A. A., Donato, S. L. R., Aspiazú, I., Silva, J. A., Donato, P. E. R., Carvalho, A. J. de. (2019). Yield and water use efficiency of cactus pear under arrangements, spacings and fertilizations. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(6), 413–418. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n6p413-418>
- Li-guo, J. I. A., Yang, C., Yong-lin, Q. I. N., Rui-fang, L., Shi-xin, C. U. I., Zhong, M. A., Ming-shou, F. A. N. (2018). Potato yield gaps across the rainfed Yin-mountain Hilly Area of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(11), 2418–2425. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62034-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62034-9)
- Lima, L. R., Silva, T. G. F., Jardim, A. M. R. F., Souza, C. A. A., Queiroz, M. G., Tabosa, J. N. (2018). Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V22N2P113-118>
- Lobell, D. B., Cassman, K. G., Field, C. B. (2009). Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 179–204. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Beserra, E. A., Lacerda, F. F. (2011). Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*.
- Medeiros, A. S., Maia, S. M. F., Santos, T. C., Gomes, T. C. A. (2020). Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287 (December 2018), 106690.

- <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>
- Medeiros, E. V., Notaro, K. A., Barros, J. A., Moraes, W. S., Silva, A. O., Moreira, K. A. (2015). Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas. *Soil and Tillage Research*, 145, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.013>
- Mendoza, P. V., Sousa, T. C., Santos, M. V. F., Mendoza, O. V. V., Dubeux Junior, J. C. B., Lira, M. A. (2019). Morfología de nopal forrajero cv Miúda (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck) en sistemas de cultivo del agreste de Pernambuco, Brasil. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 10(3), 756–766. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v10i3.4386>
- Mligo, J. K., Craufurd, P. Q. (2005). Adaptation and yield of pigeonpea in different environments in Tanzania. *Field Crops Research*, 94, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.11.009>
- Moraes, G. S. O., Guim, A., Tabosa, J. N., Chagas, J. C. C., Almeida, M. P., Ferreira, M. A. (2019). Cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions? *Livestock Science*, 221, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.026>
- Morugán-Coronado, A., Linares, C., Gómez-López, M. D., Faz, A., Zornoza, R. (2020). The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems*, 178(November 2019), 102736. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102736>
- Niechayev, N. A., Pereira, P. N., Cushman, J. C. (2019). Understanding trait diversity associated with crassulacean acid metabolism (CAM). *Current Opinion in Plant Biology*, 49, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.06.004>
- Nunes, A. T., Cabral, D. L. V., Amorim, E. L. C., Santos, M. V. F., Albuquerque, U. P. (2016). Plants used to feed ruminants in semi-arid Brazil: A study of nutritional composition guided by local ecological knowledge. *Journal of Arid Environments*, 135, 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.08.015>
- Paepe, J. L., Álvarez, R. (2016). Wheat Yield Gap in the Pampas: Modeling the Impact of Environmental Factors. *Agronomy Journal*, 108(4), 1367–1378. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0482>
- Paiva, P., Souza, I., Costa, M., Santos, A., Coelho, L. (2016). *Opuntia* sp. Cactus: Biological Characteristics, Cultivation and Applications. *Advances in Research*, 7(3), 1–14. <https://doi.org/10.9734/AIR/2016/26125>

- Pal, D., Sachan, N., Ghosh, A., Mishra, P. (2011). Biological activities and medicinal properties of *Cajanus cajan* (L) Millsp. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 2(4), 207. <https://doi.org/10.4103/2231-4040.90874>
- Payne, W. A. (2000). Optimizing Crop Water Use in Sparse Stands of Pearl Millet. *Agronomy Journal*, 92(5), 808. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.925808x>
- Peng, Z., Wang, L., Xie, J., Li, L., Coulter, J. A., Zhang, R., Luo, Z., Cai, L., Carberry, P., Whitbread, A. (2020). Conservation tillage increases yield and precipitation use efficiency of wheat on the semi-arid Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106024>
- Pereira, J. S., Cavalcante, A. B., Nogueira, G. H. M. S. M. F., Campos, F. S., Araújo, G. G. L., Simões, W. L., Voltolini, T. V. (2020). Morphological and yield responses of spineless cactus Orelha de Elefante Mexicana under different cutting intensities. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 21, 1–10. <https://doi.org/10.1590/s1519-99402121142020>
- Pino, F., Heinrichs, A. J. (2017). Sorghum forage in precision-fed dairy heifer diets. *Journal of Dairy Science*, 100(1), 224–235. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11551>
- Pourhadian, H., Kamkar, B., Soltani, A., Mokhtarpour, H. (2019). Evaluation of forage maize yield gap using an integrated crop simulation model-satellite imagery method (Case study: four watershed basins in Golestan Province). *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(2), 253–268. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1493579>
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S., Lima, L. R., Alves, J. O. (2015). Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 931–938. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S., Souza, C. A. A., Carvalho, H. F. S. (2018). Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente Semiárido. *IRRIGA*, 1(01), 141. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Souza, C. A. A., Souza, L. S. B., Steidle Neto, A. J., Araújo, G. G. L., Ferreira, W. P. M. (2019). Seasonal patterns of deposition litterfall in a seasonal dry tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279 (September 2018), 107712. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107712>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Porfírio, R., Rocha, D. A., Ambrizzi, E. T. (2010). Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2), 185–204.

- http://www.cpc.noaa.gov/products/outreach/research_papers/
- Robert, G., Rajasekar, M., Manivannan, P. (2016). Triazole-induced drought stress amelioration on growth, yield, and pigments composition of *Helianthus annuus* L.(sunflower). *International Multidisciplinary Research Journal*, 5, 6–15.
- Rong, L., Gong, K., Duan, F., Li, S., Zhao, M., He, J., Zhou, W., Yu, Q. (2021). Yield gap and resource utilization efficiency of three major food crops in the world – A review. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(2), 349–362. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63555-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63555-9)
- Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P., Bianco, R. L. (2016). Cladode growth dynamics in *Opuntia ficus-indica* under drought. *Environmental and Experimental Botany*, 122, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.10.003>
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, 153(08), 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Monteiro, L. A., Duarte, Y. (2016). *Yield Gap - Conceitos, definições e exemplos. January.*
- Sewrsaran, R., Khan, A., Stone, R., John, K. (2019). Resistance screening of 14 *Cajanus cajan* (L.) Millsp. cultivars to *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera:Bruchidae). *Journal of Stored Products Research*, 82, 67–72. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.04.007>
- Silva, J. M. C., Lacher, T. E. (2020). Caatinga—South America. In *Encyclopedia of the World's Biomes* (p. 554–561). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11984-0>
- Silva, J. V., Reidsma, P., Laborte, A. G., van Ittersum, M. K. (2017). Explaining rice yields and yield gaps in Central Luzon, Philippines: An application of stochastic frontier analysis and crop modelling. *European Journal of Agronomy*, 82, 223–241. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.017>
- Silva, T. G. F., Araújo Primo, J. T., Morais, J. E. F., Diniz, W. J. S., Souza, C. A. A., Silva, M. C. (2015). Crescimento E Produtividade De Clones De Palma Forrageira. *Revista Caatinga*, 28(2), 10–18.
- Silva, T. G. F., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Souza, L. S. B. (2017). Agrometeorological research on forage cactus and its advances in Brazil. *Amazonian Journal of Plant Research*, 1(2), 45–68. <https://doi.org/10.26545/b00006x>
- Silva, T. G. F., Primo, J. T. A., Moura, M. S. B., Silva, S. M. S., Morais, J. E. F., Pereira,

- P. C., Souza, C. A. A. (2015). Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(7), 515–525. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>
- Sinha, I., Buttar, G. S., Brar, A. S. (2017). Drip irrigation and fertigation improve economics, water and energy productivity of spring sunflower (*Helianthus annuus* L.) in Indian Punjab. *Agricultural Water Management*, 185, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.008>
- Siqueira, M. C. B., Ferreira, M. A., Monnerat, J. P. I. S., Silva, J. L., Costa, C. T. F., Conceição, M. G., Andrade, R. P. X., Barros, L. J. A., Melo, T. T. B. (2017). Optimizing the use of spineless cactus in the diets of cattle: Total and partial digestibility, fiber dynamics and ruminal parameters. *Animal Feed Science and Technology*, 226, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.12.006>
- Souza, B. I., Menezes, R., Artigas, R. C. (2015). *Efeitos da desertificação na composição de espécies do bioma Caatinga, Paraíba/Brasil*. 88, 45–59. <https://doi.org/10.14350/rig.44092>
- Taguchi, M., Makkar, F. H., Louhaichi, F. M., Duffy, R., Moretti, D. (2017). *Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear Editorial support Book design and layout*. www.fao.org/
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., Murphy, A. (2017). Fisiologia e desenvolvimento vegetal, 6ª Edição. In *Porto Alegre: Artmed: Vol. 6 ed.* (Clic Editio).
- Van Ittersum, M. K., Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52(3), 197–208. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(97\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3)
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143, 4–17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Vandenbrink, J. P., Brown, E. A., Harmer, S. L., Blackman, B. K. (2014). Turning heads: The biology of solar tracking in sunflower. *Plant Science*, 224, 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.04.006>
- Veloso, G. A., Ferreira, M. E., Ferreira Júnior, L. G., & Barbosa da Silva, B. (2020). Modelling gross primary productivity in tropical savanna pasturelands for livestock intensification in Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100288>
- Vieira, I. R., Araújo, F. S., Zandavalli, R. B. (2013). Shrubs promote nucleation in the Brazilian semi-arid region. *Journal of Arid Environments*, 92, 42–45.

<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.01.009>

- Visses, F. D. A., Sentelhas, P. C., Pereira, A. B. (2018). Yield gap of cassava crop as a measure of food security - an example for the main Brazilian producing regions. *Food Security*, 10(5), 1191–1202. <https://doi.org/10.1007/s12571-018-0831-2>
- Yahia, E. M., Sáenz, C. (2011). Cactus pear (*Opuntia* species). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (p. 290-331e). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857092762.290>
- Zhang, H., Tao, F., Zhou, G. (2019). Potential yields, yield gaps, and optimal agronomic management practices for rice production systems in different regions of China. *Agricultural Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.007>
- Zu, Q., Mi, C., Liu, D. L., He, L., Kuang, Z., Fang, Q., Ramp, D., Li, L., Wang, B., Chen, Y., Li, J., Jin, N., Yu, Q. (2018). Spatio-temporal distribution of sugarcane potential yields and yield gaps in Southern China. *European Journal of Agronomy*, 92(September 2017), 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.10.005>

CAPÍTULO II

**IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTURAS DIANTE
DOS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE A PRODUÇÃO
AGRÍCOLA – REVISÃO**

IMPORTÂNCIA DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DE CULTURAS DIANTE DOS IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS SOBRE A PRODUÇÃO AGRÍCOLA - REVISÃO

Resumo: O efeito climático é o principal responsável pelas oscilações no rendimento produtivo. Logo, é esperado que as mudanças do clima promovam alterações na agricultura, comprometam a sustentabilidade e a segurança alimentar, especialmente, em áreas semiáridas. O entendimento da amplitude desses fatores e suas consequências no rendimento agrícola mediante os diferentes cenários climáticos, regionais e tecnológicos são fundamentais nas tomadas de decisões. Para as análises desses diversos cenários, os modelos de simulação de culturas se caracterizam como ferramentas funcionais e com eficientes desempenhos na estimativa dos níveis de produtividades, desde que devidamente calibrados e validados com dados consistentes e representativos. Dentre os modelos de simulação podemos destacar: AquaCrop - FAO, ZAE - FAO, CROPGRO e Apsim como aqueles de maiores aplicabilidades nas culturas agrícolas, para fins do conhecimento das lacunas de produtividade agrícola (*Yield Gap*) e análise de calendários agrícolas. Esta revisão analisou os impactos das alterações climáticas na agricultura e o levantamento de informações dos principais modelos de simulação de culturas. Mediante síntese das informações levantadas, pode-se evidenciar o eminente impacto das alterações climáticas sobre o cenário agrícola futuro, proporcionando maior vulnerabilidade agrícola. Logo, destaca-se a importância do uso de modelos de simulação de culturas para conhecimento das lacunas de produtividade e potencial produtivo. Contudo, é evidente a necessidade de pesquisas mais detalhadas sobre a aplicabilidade dos modelos em cenários agrícolas diversos e situações climáticas amplas.

Palavras-chave: modelos agrícolas; sazonalidade climática; práticas resilientes; “*Yield Gap*”.

IMPORTANCE OF CROP SIMULATION MODELS IN VIEW OF THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON AGRICULTURAL PRODUCTION – REVIEW

Abstract: The climatic effect is the main responsible for the fluctuations in the productive yield. Therefore, it is expected that climate change will promote changes in agriculture, compromise sustainability and food security, especially in semi-arid areas. Understanding the breadth of these factors and their consequences on agricultural income through different climatic, regional and technological scenarios are fundamental in decision-making. For the analysis of these different scenarios, the crop simulation models are characterized as functional tools and with efficient performances in the estimation of the productivity levels, as long as they are properly calibrated and validated with consistent and representative data. Among the simulation models we can highlight: AquaCrop - FAO, ZAE - FAO, CROPGRO and Apsim as those with the greatest applicability in agricultural crops, being used in a recurring manner in several studies for the purpose of understanding agricultural productivity gaps, or “*Yield Gap*”. This review analyzed the impacts of climate change on agriculture and the gathering of information on the main crop simulation models. By synthesizing the information collected, it is possible to highlight the imminent impact of climate change on the future agricultural scenario, providing greater agricultural vulnerability. Therefore, the importance of using crop simulation models to understand the gaps in productivity and productive potential is highlighted. However, there is a clear need for more detailed research on the applicability of models in diverse agricultural scenarios and broad climatic situations.

Keywords: simulation models; climatic seasonality; resilient practices; *Yield Gap*

Introdução

De acordo com as projeções do IPCC (2014, 2019), as mudanças climáticas poderão ocasionar alterações nos padrões de precipitação e disponibilidade de água e a intensificação de cenários climáticos extremos. Essas mudanças podem gerar um desequilíbrio no rendimento das culturas, afetando a sustentabilidade dos sistemas agrícolas em muitas regiões, tornando as populações que dependem da produção local de alimentos mais vulneráveis (Abd-Elmabod et al., 2020; Ali et al., 2021; Martins et al., 2019).

Nesse contexto, os estudos com modelos de simulação de culturas são úteis para auxiliar na atenuação dos impactos causados pelas mudanças climáticas, melhorando o processo de tomada de decisões e aperfeiçoando os sistemas de cultivo, possibilitando análises de cenários e eficientes estratégias de manejo (Lamichhane et al., 2019; Manivasagam e Rozenstein, 2020; Tooley et al., 2021). Com a aplicação desses modelos é possível a elaboração e análise de calendários agrícolas e a viabilidade econômica. Além da obtenção de informações mais precisas sobre a capacidade de produção das culturas, que podem ser afetadas por fatores internos (genéticos e hereditários) e externos (práticas de manejo e condições ambientais), causando lacunas nos níveis de produtividade – “*Yield Gap*” (Martins et al., 2018).

Dentre os fatores ambientais, o clima responde por cerca de um terço da sazonalidade produtiva das culturas agrícolas (Leng et al., 2016). Diante disso, as informações climáticas são fundamentais para a previsão da produtividade agrícola, além de indicar a viabilidade econômica de determinadas práticas e o direcionamento das melhores estratégias para o aumento produtivo (Lamichhane et al., 2019; Palosuo et al., 2021; Sandhu e Irmak, 2019).

A realização desses estudos é possível graças à utilização de modelos de simulação de crescimento de culturas agrícolas, que relacionam os processos solo, planta, atmosfera, além das práticas de manejo realizadas (Camargo e Kemanian, 2016; Zhao et al., 2019). Battisti et al. (2018) citam a importância da comparação de distintos modelos de simulação de culturas, sendo possível identificar suas limitações e aplicabilidades. Para isto, vários são os modelos citados na literatura, podendo-se destacar: AquaCrop – FAO (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009); Agroecological Zone – FAO (Doorenbos e Kassam, 1994); Crop Simulation Model - CropGro (Boote et al., 1998) e Agricultural Production Systems Simulator – APSIM (Keating et al., 2003).

Esta revisão fez um levantamento sobre os impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento agrícola e do uso dos principais modelos utilizados para a simulação de culturas.

Alterações climáticas e impactos na agricultura

A alteração climática é uma mudança dos padrões climáticos existentes, podendo ser constatada estatisticamente pela sua distribuição por prolongados períodos de tempo, desde décadas a milhões de anos (Bhattacharya, 2019). Atualmente, este tema tem sido abordado de forma central nas áreas científicas, econômicas e públicas (Funatsu et al., 2019), tendo sido associado a emissão contínua de gases de efeito estufa (GEE) que resulta no aumento da temperatura na superfície da Terra (Karimi et al., 2018; IPCC, 2014; IPCC, 2019).

Diante esse cenário, a escassez e a dificuldade da aquisição de dados climáticos, oceânicos e hidrológicos de alta resolução, alta qualidade e históricos, juntamente com resultados de estudos científicos regionais completos, aumentam os desafios para enfrentar a sazonalidade climática e as tendências extremas (IPCC, 2014). Tais alterações climáticas e fatores ambientais já são evidenciadas em todo o planeta, inclusive em Regiões da América Central e do Sul (Figura 1).

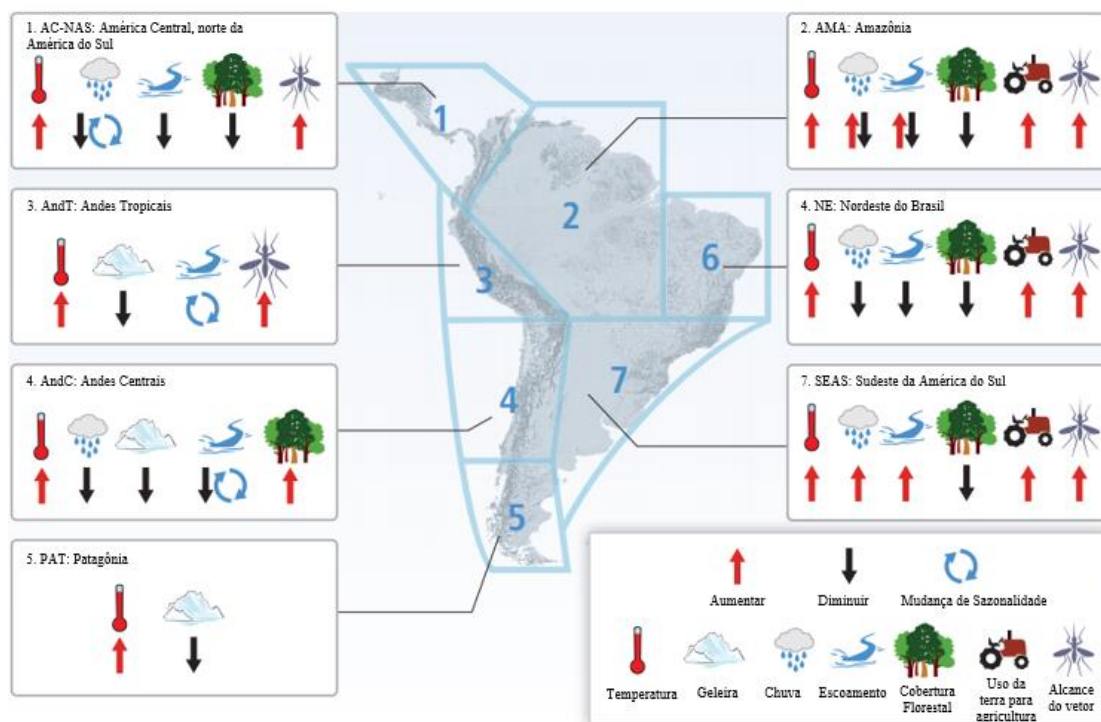


Figura 1. Resumo das mudanças observadas no clima e outros fatores ambientais em regiões representativas da América Central e do Sul (Adaptado: IPCC, 2014).

Desde 1850 observa-se elevação dos gases de efeito estufa (GEE), especialmente o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), com aumento aproximado de 40%, 150% e 20%, respectivamente (Figura 2A) (IPCC, 2014; IPCC, 2019). Fato que contribui diretamente para o aumento da temperatura global (Figura 2B), especialmente em resposta ao aumento do CO_2 , representando um sério risco a produtividade agrícola em todo o mundo.

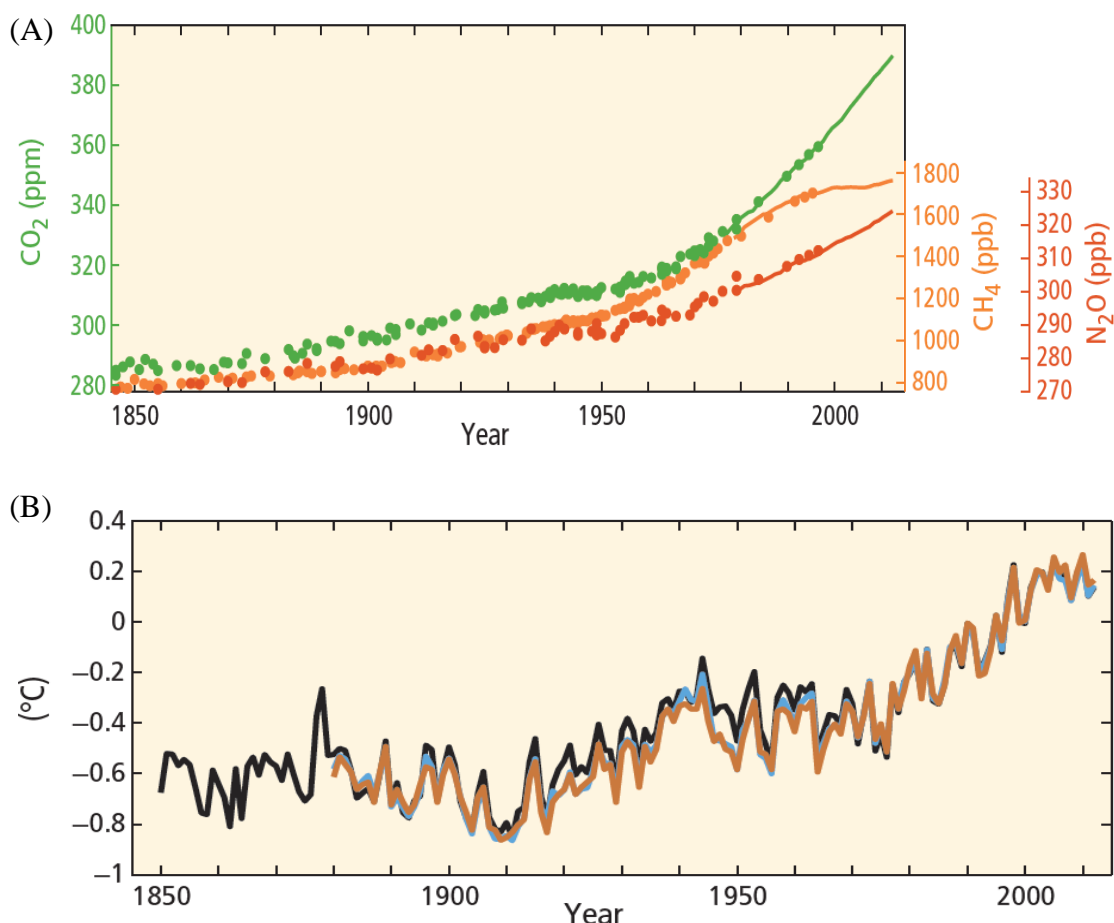


Figura 2. Indicadores de mudanças climáticas. Concentrações médias globais de gases de efeito estufa (A) e da temperatura combinada da superfície terrestre e oceânica (B). Fonte: IPCC (2019).

O setor agrícola é um dos mais vulneráveis às mudanças climáticas, e por isso tem sido objeto de diversos estudos nos últimos anos (Neset et al., 2019; Smith et al., 2014). Neste contexto, alterações na precipitação, na temperatura média, distúrbios na ocorrência de doenças e pragas, mudanças nas concentrações atmosféricas de CO_2 e alteração na qualidade nutricional de alguns alimentos são relatados (Bhattacharya, 2019). No entanto, estes efeitos apresentam distribuição irregular pelo mundo.

Um estudo (Scheelbeek et al., 2018) com análises de 1.540 experimentos, resultantes de 174 artigos de alta relevância, evidenciou os efeitos das alterações de CO₂, ozônio (O₃), disponibilidade de água, salinidade e temperatura do ar no rendimento e qualidade nutricional nos vegetais e nas leguminosas. A partir deste, foram constatadas mudanças na produção para todos os vegetais e as leguminosas combinados, com +22% para aumento de 250 ppm na concentração de CO₂, -8,9% para o aumento de 25% da concentração de O₃, -34,7% para a redução de 50% na disponibilidade de água, -2,3% para aumento de 25% na salinidade e -31,5% para o aumento de 4% da temperatura.

Na região semiárida do Zimbábue, um estudo (Makuvuro et al., 2018) simulou os efeitos ocasionados pelo aumento na temperatura de 2,3 - 4,5 °C, diminuição da precipitação entre 10 - 15% e uma concentração de CO₂ equivalente a 532 ppm na produção do milho (SC403) e duração do seu ciclo de cultivo até 2050. O estudo evidenciou que as mudanças dessas variáveis climáticas ocasionaram queda de 16% na produção de grãos e diminuição de aproximadamente 23 dias para a maturidade. Estes efeitos foram atribuídos à redução dos graus-dias necessários para maturação fisiológica do milho, com diminuição dos estádios fisiológicos e o tempo de assimilação de CO₂ e, que resultam na redução do acúmulo de matéria seca.

A elevação do CO₂ estimula o crescimento das plantas em condições ideais de nitrogênio, mas sob deficiência deste elemento, podem haver alterações no seu metabolismo primário e redução do crescimento (Takatani et al., 2014). As plantas expostas a elevados níveis de CO₂ apresentam uma série de alterações fisiológicas e químicas. Nas leguminosas há mudanças na qualidade nutricional, na rizosfera, na fixação biológica de nitrogênio, na eficiência no uso da água, dentre outras (Palit et al., 2020). Por estes motivos, perdas significativas no rendimento das colheitas e tenderão a se agravar com o tempo. Em curto prazo, estima-se que as perdas de até 25%, entretanto, projeções para o ano 2080 indicam que estas podem chegar à 50%, de acordo com a cultura e região (Aggarwal et al., 2019).

É possível observar que as mudanças climáticas afetam a sustentabilidade dos sistemas agrícolas em diversas regiões do mundo, ocasionando os maiores impactos às populações que dependem da produção local para alimentação. Em razão disso, a segurança alimentar enfrentará desafios importantes, principalmente em regiões com climas semiáridos, tornando fundamentais o aumento e a melhoria das tecnologias no cultivo afim de minimizar tais efeitos adversos (Funatsu et al., 2019; Martins et al., 2019).

Uso da modelagem agrícola para simulação de sistemas produtivos

As alterações climáticas globais como elevação do CO₂, da temperatura, e mudanças nos regimes hídricos afetam diretamente os sistemas agrícolas, causando distúrbios nas características fisiológicas, alterando seu crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas (Asseng et al., 2015; Minoli et al., 2019).

Diante de tal cenário, o conhecimento dos principais fatores de redução na produtividade agrícola e a adoção de eficientes práticas de manejo se configuram como alternativas de mitigação à sazonalidade climática, elevando os níveis de produtividade e, mesmo a estabilidade ao longo do ano para esse setor produtivo (Battisti et al., 2018).

As melhorias nos sistemas de produção podem ser qualificadas mediante a utilização de modelos de simulação de crescimento de culturas, que relacionam os processos solo, planta, atmosfera, além das práticas de manejo adotadas (Camargo e Kemanian, 2016; Zhao et al., 2019).

Este método tem se configurado como ótima ferramenta no cenário atual, em razão da necessidade de elucidação acerca dos efeitos das mudanças climáticas sobre a produtividade agrícola e a adoção de possíveis estratégias de manejo (data de plantio e densidade), colheitas, dentre outros (Jardim et al., 2021; Wit et al., 2019; Holzworth et al., 2015; Manivasagam e Rozenstein, 2020). Os modelos de culturas são cada vez mais utilizados em aplicações experimentais e práticas (Figura 3).

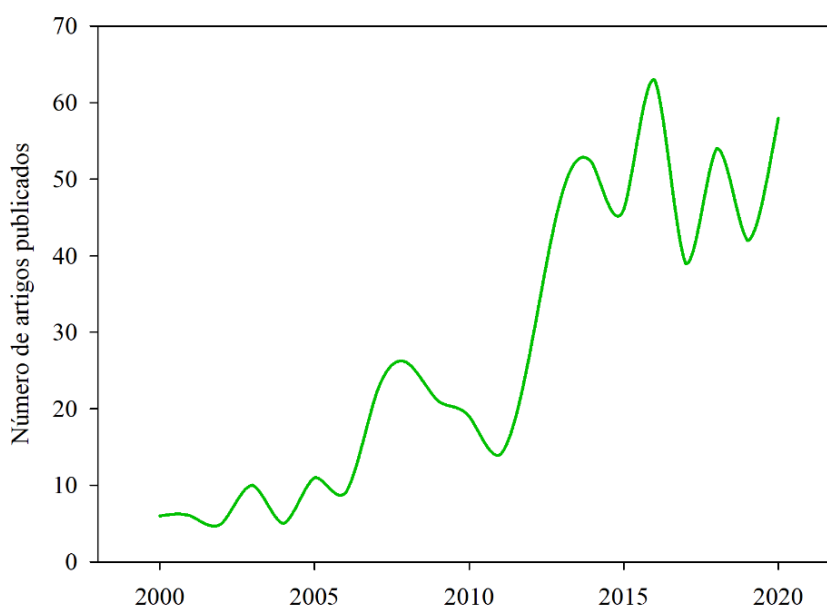


Figura 3. Número de artigo de pesquisa relacionados a estudos com modelos de simulação de culturas publicados entre 2000 e 2020. Fonte: Portal de pesquisa de documentos Scopus - acessado em 21 de julho de 2021.

A precisão e a confiabilidade dos resultados destas simulações dependem da eficiente parametrização e calibração dos modelos (Khaliq et al., 2019; Martins et al., 2018). De acordo com Battisti et al. (2017), o nível de complexidade e o processo de simulação são outros fatores essenciais. Logo, a comparação de distintos modelos de simulação de culturas é fundamental, possibilitando a análise de suas particularidades com o objetivo de identificar suas limitações e aplicabilidades (Battisti et al., 2018; Camargo e Kemanian, 2016; Vanuytrecht et al., 2014). A partir dos modelos, relações entre os níveis de produtividades e os diversos fatores adversos são simulados por meio de funções determinísticas (Ammar e Davies, 2019). Basso et al. (2015) e van Bussel et al. (2011) afirmam que os modelos de simulação de culturas são mais eficientes do que os estatísticos para a estimativa das produtividades futuras das culturas agrícolas.

Dentre os diversos modelos de culturas existentes, destacam-se: Agroecological Zone (Doorenbos e Kassam, 1994); Aquacrop (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009); Crop Simulation Model – CropGro (Boote et al., 1998) e Agricultural Production Systems Simulator – APSIM (Keating et al., 2003). Esses evidenciam-se por apresentarem melhores resultados nas simulações de culturas agrícolas, além de incorporar metodologias que minimizam a quantidade de parâmetros de entrada nos modelos, tornando-os mais aplicáveis e com resultados mais eficientes.

Aplicação dos principais modelos de simulação de crescimento de culturas agrícolas

O Agroecological Zone Model (AZM – FAO) foi aplicado na identificação do “*Yield Gap*” entre cultivos de sequeiro e irrigado na cana-de-açúcar, e sua resposta na eficiência no uso do solo e da água em diversas regiões do Brasil (Piffer Cardozo et al., 2018). A partir das simulações realizadas com este modelo, foi possível verificar que os efeitos da variabilidade climática na produtividade e rentabilidade econômica influenciam diretamente na identificação das melhores datas de plantio para o sistema de sucessão soja-milho (Nóia Júnior e Sentelhas, 2019).

A partir de simulações com uso do modelo AquaCrop, verificou-se as melhores datas de plantio do sorgo em condições de sequeiro, além de instruções de práticas mais eficientes para produção em sistemas agroecológicos, na África do Sul (Hadebe et al., 2020). Com uso deste modelo também foi possível realizar estimativas da cobertura do dossel, água disponível no solo, rendimento de grãos, evapotranspiração da cultura e eficiência no uso da água para a cultura do milho em condições irrigadas e sequeiro em

Nebraska (EUA) (Sandhu e Irmak, 2019) e a produção de grãos com diferentes níveis de Nitrogênio, na Nigéria (Akumaga et al., 2017).

O modelo CROPGRO foi empregado em estudos com objetivos diversos, desde a predição de rendimento da soja em condições irrigadas e de sequeiro, na Índia (Bhatia et al., 2008), até a identificação das regiões mais produtivas do Brasil mediante o déficit hídrico (Battisti e Sentelhas, 2019). Com a adaptação e parametrização desse modelo ainda é possível simular as características produtivas das culturas forrageiras (*Brachiaria brizantha*), como o crescimento e rendimento em sistema monocultivo (Pedreira et al., 2011) e sistema silvipastoril com eucalipto (Bosi et al., 2020).

Para a identificação das lacunas na produtividade em sistema de rotação milho-soja, com práticas de manejo simples e avançadas, no Oeste dos Estados Unidos, Balboa et al. (2019) utilizaram o modelo APSIM. Esse também foi utilizado para a simulação do rendimento do trigo, em condição de sequeiro, na Austrália (Hochman et al., 2016). No Brasil, Dias; Sentelhas. (2018) aplicaram o modelo APSIM no estudo das limitações de rendimento da cana-de-açúcar e as principais causas, desde déficit hídrico a manejo de cultivo.

Muitos estudos ainda comparam a aplicação desses modelos para diversas culturas e manejos, identificando limitações e recomendando aqueles mais eficientes para distintas condições agrícolas e ambientais (Battisti et al., 2018; Dias e Sentelhas, 2018; Elli et al., 2019).

Descrição do Agroecological Zone Model – FAO (AZM - FAO)

O Agroecological Zone Model da FAO é um modelo simples de crescimento de cultura empregado para analisar a relação existente entre a produtividade e as condições climáticas (Doorenbos e Kassam, 1994). O mesmo baseia-se na estimativa da produtividade potencial (PP) para uma cultura padrão altamente produtiva sob condições ideais, por meio de equações matemáticas que são posteriormente corrigidas para a cultura de interesse. Já a produtividade atingível (PA), que considera as quebras de produtividade da PP ocasionadas pelo déficit hídrico, é estimada pelo modelo nas diferentes fases fenológicas e modulada por um Índice de Sensibilidade da Cultura ao Déficit Hídrico (Ky), que engloba todas as características associadas à resposta da espécie (Figura 4) (Battisti e Sentelhas, 2015; Dias e Sentelhas, 2018; Andrioli e Sentelhas, 2009; Cardozo et al., 2018)

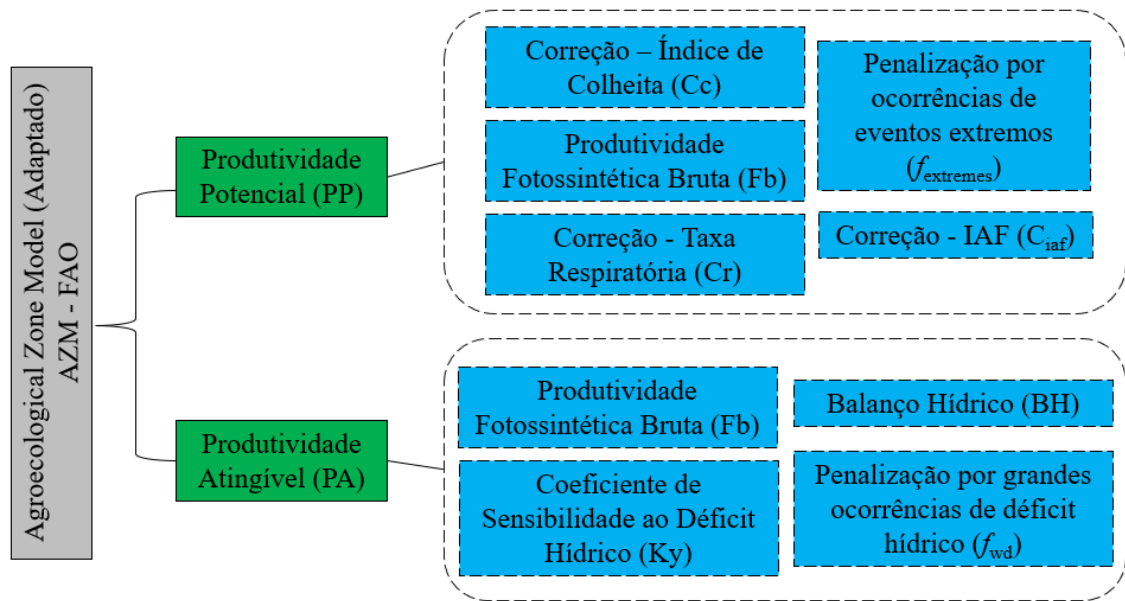


Figura 4. Diagrama geral dos parâmetros originais e incluídos na Adaptação do Agroecological Zone Model (AZM – FAO).

O cálculo da produtividade potencial da cultura é realizado por meio da taxa de produtividade bruta e de uma cultura padrão corrigida por fatores adimensionais:

$$PP = PB \times C_{IAF} \times C_R \times C_C \times C_{UM} \times ND \quad (1)$$

Em que: PB - produtividade bruta de matéria seca (kg, MS ha⁻¹dia⁻¹); CIAF - coeficiente de correção do índice de área foliar (IAF); CR - coeficiente de correção da respiração; CC - coeficiente de correção da fração colhida (índice de colheita); CUM - coeficiente de correção da umidade da fração colhida; e, ND - número de dias do ciclo.

A produtividade atingível é determinada diretamente por fatores determinantes que condicionam a PP e pelos fatores redutores ocasionados pela disponibilidade hídrica do solo, como pode ser evidenciado na equação seguinte:

$$PA = PP \times \left\{ 1 - K_y \times \left[1 - \left(\frac{ET_r}{ET_m} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

Em que: ETr - evapotranspiração real da cultura; ETm - evapotranspiração máxima da cultura, que pode ser obtido pelo produto entre a evapotranspiração de referência (ETo) e o coeficiente da cultura (kc).

No Brasil, o Agroecological Zone Model – FAO tem sido aplicado com diversas finalidades, como estimativas de produtividade (Leonardo Amaral Monteiro & Sentelhas, 2014), definição das melhores épocas no ano para semeadura (Rolim et al., 2001), tolerância de determinadas culturas à déficits hídricos (Battisti e Sentelhas, 2015) e análise da eficiência do manejo agrícola (Battisti et al., 2013).

O modelo apresentou resultados eficazes na avaliação dos impactos das datas de plantio para a produtividade e rentabilidade econômica do sistema agrícola de sucessão de soja-milho para diferentes regiões do Brasil (Nóia Júnior e Sentelhas, 2019). Adicionalmente, foi possível realizar estimativas do aumento produtivo da cana-de-açúcar em sistemas irrigados, mediante as interações climáticas e eficiência agrícola para diferentes regiões brasileiras com uso do AZM - FAO (Cardozo et al., 2018).

Modelo AquaCrop – FAO

O AquaCrop é um modelo de crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas, o qual realiza a simulação da produtividade de espécies herbáceas sob diferentes condições hídricas. Este foi desenvolvido pela Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, com o intuito de estudar a segurança alimentar e estimar a produtividade das culturas mediante a interação entre o ambiente biofísico e o manejo agrícola (Adeboye et al., 2019; Foster et al., 2017; Karuku e Mbindah, 2020; Pirmoradian e Davatgar, 2019; Steduto et al., 2009).

A estimativa do acúmulo de biomassa é realizada a partir do produto entre a transpiração da cultura e um parâmetro de produtividade da água (Eq. 3).

$$B = WP \times \sum Tr \quad (3)$$

Em que: B - biomassa seca acima do solo (ton ha^{-1}), WP - produtividade da água (biomassa por unidade de transpiração cumulativa) e Tr - transpiração da cultura.

O rendimento das culturas (Eq. 4) é então calculado a partir do produto da biomassa seca acima do solo e do índice de colheita (IC). Este parâmetro aumenta durante o estágio de crescimento e é influenciado por estresses hídricos e térmicos (Steduto et al., 2007).

$$Y = B \times HI \quad (4)$$

Em que: Y - rendimento da colheita, HI - índice de colheita.

O processo de simulação evolui a partir da equação original proposta por Doorenbos e Kassam (1979), que considera a produtividade e evapotranspiração como termos relativos, estimando a lacuna de produtividade potencial da planta durante seu ciclo sob o efeito ocasionado pelo déficit hídrico no solo (Foster et al., 2017; Steduto et al., 2007).

A partir desse princípio de divisão da evapotranspiração em processos distintos de transpiração da cultura e evapotranspiração de água no solo (Doorenbos e Kassam, 1979) é possível eliminar o suposto efeito da evaporação, principalmente em situações em que o solo não apresenta cobertura superficial completa (Steduto et al., 2009).

O processo de transferência contínua caracteriza-se como a principal base estrutural do modelo AquaCrop. O mesmo simula a interação entre o solo (balanço hídrico), planta (crescimento, desenvolvimento e produtividade), atmosfera (temperatura do ar, precipitação, demanda evaporativa e concentração de dióxido de carbono) e manejo agrícola, (irrigação, fertilização, cobertura do solo) (Steduto et al., 2009). Tais fatores afetam o balanço hídrico do solo, crescimento e desenvolvimento, eficiência do uso da água e a produtividade da cultura (Figura 5). Os efeitos de pragas e doenças, no entanto, não são considerados.

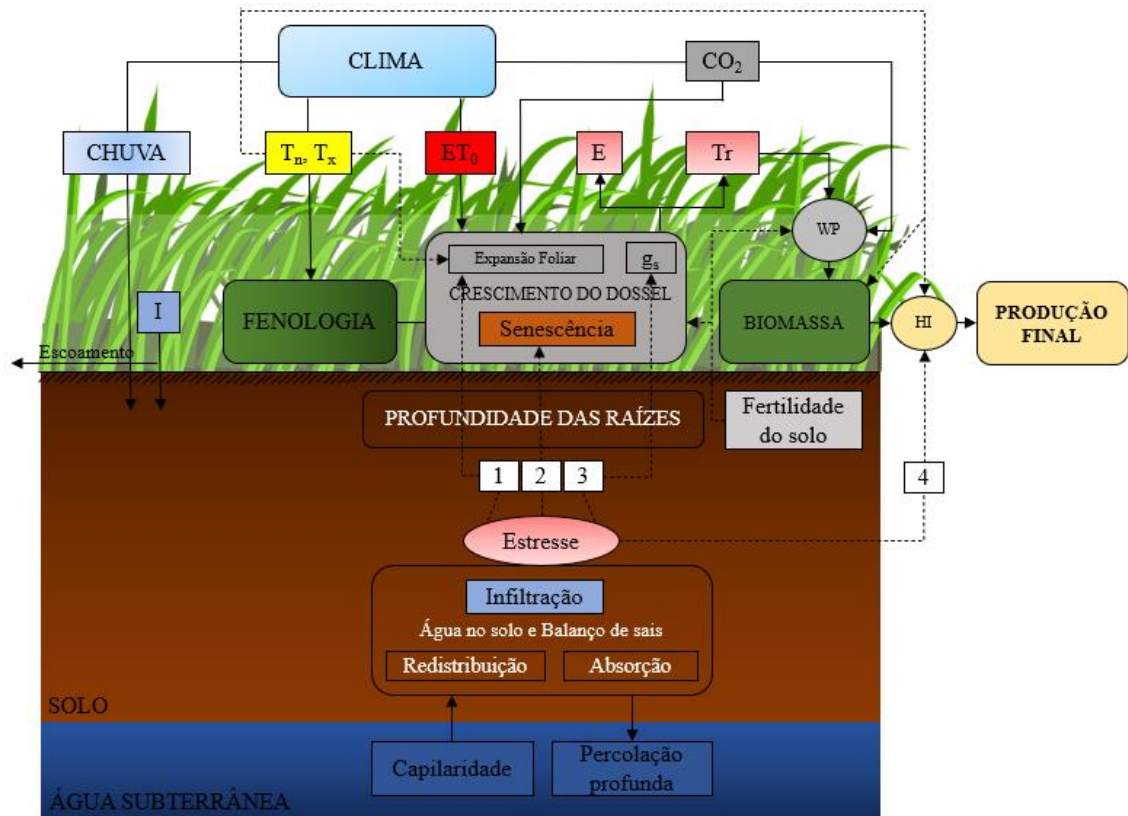


Figura 5. Estrutura do modelo AquaCrop com destaque aos principais componentes da interação solo-planta-atmosfera e parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I – irrigação; Tn – temperatura mínima do ar; Tx – temperatura máxima do ar; ET₀ – evapotranspiração de referência; E – evaporação do solo; Tr – transpiração da cultura; g_s – condutância estomática; WP – produtividade da água; HI (IC) – índice de colheita; CO₂ – concentração de dióxido atmosférico; Escoamento – escoamento superficial; (1), (2), (3), (4) – diferentes respostas ao estresse hídrico. As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos e as linhas tracejadas indicam retroalimentação. Adaptado de Steduto et al. (2009).

Quando comparado a outros modelos de simulação, o AquaCrop necessita de um número reduzido de variáveis e parâmetros de entrada, os quais são facilmente computados. Apesar das características de simplicidade do modelo, quando bem calibrado e validado, o mesmo oferece um grande equilíbrio na precisão da produção (Martini, 2018; Steduto et al., 2007; Vanuytrecht et al., 2014a; Xu et al., 2019).

Os dados de entrada utilizados para a calibração são inseridos conforme descrito por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009). A calibração é realizada com a quantidade mínima de variáveis (Tabela 1) sendo consideradas como as principais para o ajuste a cobertura do dossel e a biomassa, ambas observadas em campo (Akumaga et al., 2017; Hadebe et al., 2020; Sandhu e Irmak, 2019; Xu et al., 2019).

Tabela 1. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo AquaCrop

Parâmetros	Unidades
Densidade de plantio	plantas m ⁻²
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	%
Expansão do dossel	% dia ⁻¹
Máximo desenvolvimento do dossel	%
Declínio do dossel	% dia ⁻¹
Emergência	DAP ou GD
Máximo desenvolvimento do dossel	DAP ou GD
Início da senescência	DAP ou GD
Início da floração	DAP ou GD
Profundidade da raiz	m
Profundidade máxima da raiz	DAP ou GD
Max. transpiração da cultura	adm
Produtividade da água normalizada	g m ⁻²
Índice de colheita – HI	%
Função de expansão do dossel	-
Função de fechamento estomático	-
Função de senescência no dossel precoce	-
Temperatura base	°C
Temperatura superior	°C

Em que: DAP – dias após o plantio; GD – graus-dias; adm – adimensional.

Esses parâmetros podem ser obtidos por meio de medições em campo, realização de estimativas e/ou, quando não houver disponibilidade da variável requerida, mediante estudos com características de sistema de cultivo semelhantes disponíveis na literatura. A partir disso, tem-se a metodologia aplicável para aquisição dos valores de entrada:

- Densidade de plantio: atendendo as recomendações de espaçamento da cultura, é possível a contabilização do quantitativo de plantas por m².
- Cobertura dossel: em vez do Índice de Área Foliar (IAF), o AquaCrop usa a cobertura do dossel verde (CC) para expressar o desenvolvimento foliar da cultura, com exposto na equação seguinte:

$$CC = 1.005 \times [1 - \exp(-0.6 \times IAF)]^{1.2} \quad (5)$$

O desenvolvimento do dossel em condições ideais é descrito por alguns parâmetros, como a cobertura inicial do dossel com 90% de emergência (CCo) e a cobertura máxima do dossel quando está totalmente desenvolvido (CCx);

Já o coeficiente de crescimento do dossel (CGC), usado para descrever a expansão do dossel entre a emergência e o desenvolvimento total e o coeficiente de declínio do dossel (CDC), usado para descrever a fase de declínio devido à senescência foliar à medida que a cultura se aproxima da maturidade, podem ser obtidos mediante a inserção de valores por tentativa e erro até a máxima aproximação dos valores reais obtidos em campo.

- O desenvolvimento do sistema radicular ao longo do ciclo pode ser obtido por análise biométrica em raízes de plantas amostrais no campo, ou com embasamento teórico disponível em trabalhos com características de cultivar, clima, solo e manejo semelhantes.

Os resultados obtidos a partir das simulações são confrontados com os dados observados em campo e, posteriormente, validados com indicadores estatísticos e de performance. As simulações do modelo AquaCrop apresentaram resultados satisfatórios para diversos manejos agrícolas e culturas de metabolismos C₃ e C₄ (Adeboye et al., 2019; Araya et al., 2016; Battisti et al., 2017; Hadebe et al., 2020), tornando-o aplicável nas estimativas de produção agrícola.

Modelo Crop Simulation – CROPGRO

O CROPGRO é um modelo mecanicista que simula os processos de crescimento e desenvolvimento de culturas, fenologia, fotossíntese, demanda de nitrogênio e carbono da planta, balanço hídrico do solo e os danos ocasionados pela incidência de pragas e doenças. O CROPGRO está integrado ao Sistema de Decisão e Suporte à Transferência de Agrotecnologia (DSSAT), permitindo aos usuários simular diversas situações de manejo de culturas no decorrer de vários anos (Alderman et al., 2015; Boote et al., 1998; Silva et al., 2021; Singh et al., 2017).

O DSSAT é composto por uma variedade de programas independentes que operam juntos. Os modelos de simulação de cultura são a base central do processo (Figura 6). A partir dos bancos de dados de clima, solo, condições ambientais, observações de campo e informações de genótipos é possível a aplicação dos modelos em diferentes situações existentes. O software ajuda os usuários a preparar esses bancos de dados e compara os

resultados simulados com os observados, aumentando a confiança nos modelos, além de determinar se modificações são necessárias para melhorar a precisão (Uehara, 1989; Jones et al., 1998). Além disso, os programas contidos no DSSAT permitem que os usuários simulem opções de manejo de safras ao longo de vários anos para avaliar os riscos associados a cada opção (Jones et al., 2003)

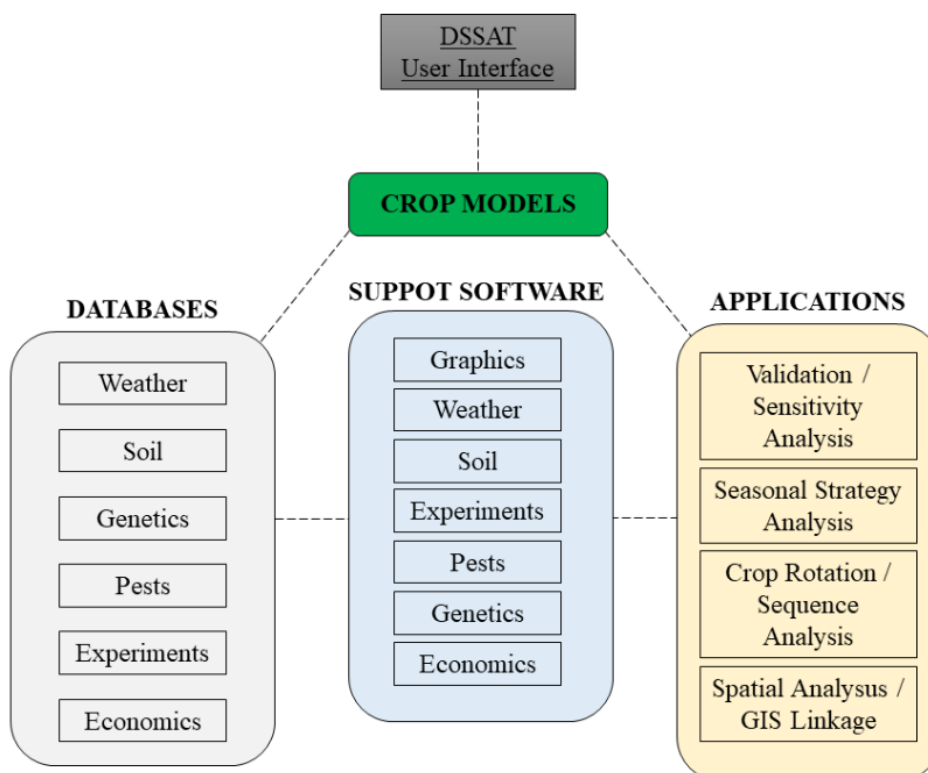


Figura 6. Diagrama do modelo DSSAT com seus bancos de dados, aplicativos e componentes de software. Adaptado de Jones et al. (2003).

O modelo DSSAT possui um código genérico, ou seja, o modelo pode ser usado para diferentes culturas. Os parâmetros de espécies, ecotipos e cultivares, que controlam vários aspectos do crescimento e desenvolvimento das culturas, são mantidos em arquivos externos (Figura 4). Todavia, há uma separação entre os parâmetros de entrada, característicos das culturas, e aqueles do código-fonte existentes no modelo, facilitando-se então a adaptação para novas espécies (Boote et al., 1998; Jones et al., 2003; Pequeno et al., 2018).

Os principais coeficientes das culturas utilizados para calibração do CROPGRO são definidos na Tabela 2. A partir dessa calibração é possível simular o crescimento diário e o desenvolvimento em resposta às condições climáticas e do solo e ao manejo da cultura (Guerra et al., 2008). Os procedimentos gerais de calibração e definição dos parâmetros de entrada do modelo são semelhantes entre estudos com o CROPGRO, que começa com

os coeficientes iniciais que são extraídos do arquivo de genótipo do DSSAT e seleciona o melhor valor para cada coeficiente avaliando o erro quadrático médio (RMSE) entre as variáveis simuladas e observadas (Alderman et al., 2015; Bao et al., 2015; Bosi et al., 2020; Wang et al., 2020).

Tabela 2. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo COPGRO - DSSAT

Coefficiente	Definição	Unidade
CSDL	Duração curto do dia na qual o desenvolvimento reprodutivo progride sem efeitos da radiação	H
PPSEN	Declínio da resposta relativa de desenvolvimento ao fotoperíodo com o tempo	1/h
EM-FL	Tempo entre a emergência da planta e o aparecimento da flor	°C dia ⁻¹
FL-SH	Tempo entre a primeira flor e a primeira vagem	°C dia ⁻¹
FL-SD	Tempo entre a primeira flor e a primeira semente	°C dia ⁻¹
SD-PM	Tempo entre a primeira semente e a maturidade fisiológica	°C dia ⁻¹
FL-LF	Tempo entre a primeira flor e o final da expansão da folha	°C dia ⁻¹
SFDUR	Duração do enchimento de sementes para corte de frutos em condições de crescimento padrão	°C dia ⁻¹
PODUR	Tempo necessário para que o cultivar alcance a carga final da vagem em condições ideais	°C dia ⁻¹
LFMAX	Taxa máxima de fotossíntese foliar a 30 °C, 350 vpm CO ₂ e luz alta	mg CO ₂ m ⁻² s ⁻¹
SLAVR	Área foliar específica da cultivar sob condições de crescimento padrão	cm ² g ⁻¹
SIZLF	Tamanho máximo da folha inteira (três folíolos)	cm ²
XRFT	Fração máxima de crescimento diário que é particionada em semente + casca	-
WTPSD	Peso máximo por semente	g
SDPDV	Semente média por vagem em condições de crescimento padrão	n° por vagem

Após a calibração do modelo e simulação, os resultados são confrontados com dados observados em campo. Geralmente, a produtividade de biomassa e a cobertura do dossel são os principais fatores de comparações. Os valores simulados e observados são submetidos a análises estatísticas, afim de evidenciar a precisão e confiança do modelo (Bosi et al., 2020; X. Wang et al., 2020).

Diversos estudos constataram eficiência nas simulações do modelo CROGRO, para diferentes culturas, como feijão (Alderman et al., 2015; Santos et al., 2016), algodão (Wang et al., 2020), forragens perenes (Bosi et al., 2020; Pedreira et al., 2011; Pequeno et al., 2018) e soja (BAO et al., 2015; Bhatia et al., 2008).

Modelo Agricultural Production Systems Simulator – APSIM

O modelo Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) foi desenvolvido pela Unidade de Pesquisa em Sistemas de Produção Agrícola (APSRU), na Austrália, com o objetivo de melhorar a gestão agrícola (Keating et al., 2003; Mccown et al., 1996). O modelo foi projetado por pesquisadores e programadores, visando simular sistemas agrícolas complexos e sob riscos na produção (Holzworth et al., 2014; McCown et al., 1995; Morel et al., 2021).

A estrutura do APSIM permite que os módulos de cada componente mais importante do sistema de cultivo sejam interconectados, por módulos biofísicos e de gestão, possibilitando realizar simulações ambientais de manejo (plantio, cobertura vegetal, adubação, controle fitossanitário) e seus efeitos na produção e recursos do solo (matéria orgânica, acidificação e erosão) (Akhavizadegan et al., 2021; Gaydon et al., 2017; Holzworth et al., 2018; Keating et al., 2003). De acordo com McCown et al. (1995), o APSIM diferencia-se dos demais modelos por definir o solo, e não a cultura, como o principal componente da simulação.

A produtividade real é eficientemente simulada pelo APSIM para mais de 20 culturas e diferentes sistemas de cultivo. O modelo é adequado para avaliar os impactos na produtividade final das culturas ocasionadas por alterações nas propriedades físico químicas do solo em longo prazo (Asseng et al., 2011; Berghuijs et al., 2021; Gaydon et al., 2017; Mccown et al., 1996; Mohanty et al., 2012).

De forma básica, o modelo APSIM está estruturado em quatro módulos (Figura 7). Keating et al. (2003) descreve a estrutura do modelo APSIM como um conjunto de módulos biofísicos que realizam a simulação de processos biológicos e físicos em ambientes agrícolas; um conjunto de módulos de gerenciamento que permitem ao usuário definir as regras de gerenciamento projetado para melhores resultados na simulação; vários módulos que permitem maior facilidade na aquisição dos dados de entrada e saída, além da simulação; e, uma metodologia que realiza todo o processo de simulação mantendo o controle das informações obtidas de forma independente.

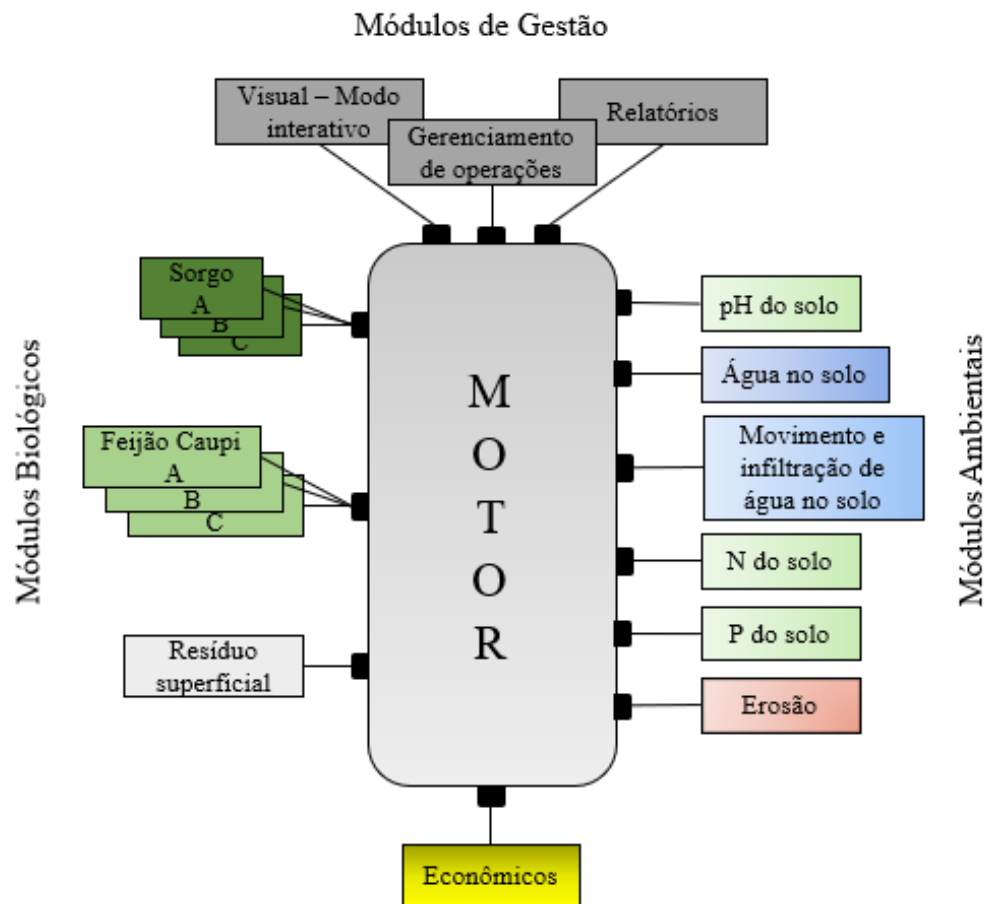


Figura 7. Representação da estrutura do modelo APSIM com os módulos individuais de cultura e solo, módulos e mecanismos de simulação. Adaptado de Keating et al. (2003) e McCown et al. (1995).

Para os processos de calibração do modelo APSIM, os principais parâmetros de entrada são obtidos em campo a partir de dados reais das culturas. Para tal, são analisados parâmetros específicos das culturas que incluem número mínimo e máximo de folhas, taxa de aparecimento de folhas, tempo térmico para mudanças fenológicas e eficiência no uso da radiação (EUR) (Tabela 3).

Tabela 3. Principais parâmetros utilizados para calibração do modelo APSIM

Símbolo	Descrição	Unidade
Tb	Temperatura base	°C
Nf₀	Número de folhas na emergência	
Nfmin	Número mínimo de folhas	
Nfmax	Número máximo de folhas	
Tmaxlob	Tempo térmico necessário para o desenvolvimento do maior número de lóbulos	°C dia ⁻¹
Tultlob	Tempo térmico necessário para o desenvolvimento do último lóbulo foliar	°C dia ⁻¹
Temrg-juv	Tempo térmico entre a emergência e o final do estágio juvenil	°C dia ⁻¹
Tjuv-inflor	Tempo térmico entre o final do estágio juvenil e a iniciação floral	°C dia ⁻¹
Tfband-flor	Tempo térmico entre o aparecimento da folha bandeira e a floração	°C dia ⁻¹
Tflor-graos	Tempo térmico entre a floração e o início do enchimento dos grãos	°C dia ⁻¹
Tflor-mat	Tempo térmico entre a floração e a maturidade fisiológica	°C dia ⁻¹
EUR	Eficiência do uso da radiação (biomassa)	g MJ ⁻¹

A partir dos resultados obtidos com as simulações, são realizadas análises comparativas com os dados observados em campo. Com isso é possível validar estatisticamente a utilização desse modelo para determinada cultura e/ou sistema produtivo.

Considerações finais

Esta revisão fez um levantamento sobre os impactos das mudanças climáticas no desenvolvimento agrícola e do uso dos principais modelos utilizados para a simulação de culturas. A pesquisa demonstrou que as mudanças climáticas podem intensificar as perdas de produtividade das culturas agrícolas e que neste caso, o uso de modelagem é fundamental para a compreensão e preenchimento de lacunas existentes, especialmente em sistemas de cultivo com informações incipientes, como é o caso de culturas forrageiras.

O uso de determinado modelo de simulação de cultura deve ser com base criteriosa, mediante a existência e disponibilidade de consistentes dados, além do conhecimento da sua limitação diante determinados cenários climáticos e de cultivos.

Para resultados científicos de maiores relevâncias, recomenda-se à melhoria da relação entre experimentos e modelos. Direcionando os estudos para as diferentes

estações do ano, além de ampliar a análise sistemática entre os diversos fatores extremos de clima × genótipo × manejo agrícola.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco - FACEPE (processos: APQ-0215-5.01/10 e FACEPE – APQ – 1159 - 1.07/14). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (processos: 475279/2010-7, 476372/2012-7, 305286/2015-3, 309421/2018-7 e 152251/2018-9). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES (Código Financeiro 001) pela bolsa de pesquisa e estudo.

Referências

- Abd-Elmabod, S. K., Muñoz-Rojas, M., Jordán, A., Anaya-Romero, M., Phillips, J. D., Laurence, J., Zhang, Z., Pereira, P., Fleskens, L., van der Ploeg, M., de la Rosa, D. (2020). Climate change impacts on agricultural suitability and yield reduction in a Mediterranean region. *Geoderma*, 374(April), 114453. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114453>
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adekalu, K. O., Prasad, K. C. (2019). Performance evaluation of AquaCrop in simulating soil water storage, yield, and water productivity of rainfed soybeans (*Glycine max L. merr*) in Ile-Ife, Nigeria. *Agricultural Water Management*, 213, 1130–1146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>
- Aggarwal, P., Vyas, S., Thornton, P., Campbell, B. M., Kropff, M. (2019). Importance of considering technology growth in impact assessments of climate change on agriculture. *Global Food Security*, 23(April), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.04.002>
- Akhavizadegan, F., Ansarifard, J., Wang, L., Huber, I., Archontoulis, S. V. (2021). A time-dependent parameter estimation framework for crop modeling. *Scientific Reports*, 11(1), 11437. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90835-x>
- Akumaga, U., Tarhule, A., Yusuf, A. A. (2017). Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.011>
- Alderman, P. D., Boote, K. J., Jones, J. W., Bhatia, V. S. (2015). Adapting the CSM-

- CROPGRO model for pigeonpea using sequential parameter estimation. *Field Crops Research*, 181, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.05.024>
- Ali, U., Jing, W., Zhu, J., Omarkhanova, Z., Fahad, S., Nurgazina, Z., Khan, Z. A. (2021). Climate change impacts on agriculture sector: A case study of Pakistan. *Ciência Rural*, 51(8), 2021. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200110>
- Ammar, M. E., Davies, E. G. R. (2019). On the accuracy of crop production and water requirement calculations: Process-based crop modeling at daily, semi-weekly, and weekly time steps for integrated assessments. *Journal of Environmental Management*, 238, 460–472. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.030>
- Andrioli, K. G., Sentelhas, P. C. (2009). Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. In *Pesq. agropec. bras* (Número 7). <http://www.scielo.br/pdf/pab/v44n7/01.pdf>
- Araya, A., Kisekka, I., Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Asseng, S., Foster, I., Turner, N. C. (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Global Change Biology*, 17(2), 997–1012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02262.x>
- Asseng, S., Zhu, Y., Wang, E., Zhang, W. (2015). Crop modeling for climate change impact and adaptation. In *Crop Physiology* (p. 505–546). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-417104-6.00020-0>
- Balboa, G. R., Archontoulis, S. V., Salvagiotti, F., Garcia, F. O., Stewart, W. M., Francisco, E., Prasad, P. V. V., Ciampitti, I. A. (2019). A systems-level yield gap assessment of maize-soybean rotation under high- and low-management inputs in the Western US Corn Belt using APSIM. *Agricultural Systems*, 174, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.04.008>
- Bao, Y., Hoogenboom, G., McClendon, R. W., Paz, J. O. (2015). Potential adaptation strategies for rainfed soybean production in the south-eastern USA under climate change based on the CSM-CROPGRO-Soybean model. *The Journal of Agricultural Science*, 153(5), 798–824. <https://doi.org/10.1017/S0021859614001129>
- Basso, B., Hyndman, D. W., Kendall, A. D., Grace, P. R., Robertson, G. P. (2015). Can Impacts of Climate Change and Agricultural Adaptation Strategies Be Accurately Quantified if Crop Models Are Annually Re-Initialized? *PLOS ONE*, 10(6), e0127333–e0127333. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127333>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C. (2015). *Drought tolerance of brazilian soybean cultivars*

- simulated by a simple agrometeorological yield model. 51(2), 285–298.*
<https://doi.org/10.1017/S0014479714000283>
- Battisti, R., Parker, P. S., Sentelhas, P. C., Nendel, C. (2017). Gauging the sources of uncertainty in soybean yield simulations using the MONICA model. *Agricultural Systems*, 155, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.004>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C. (2019). Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. *Field Crops Research*, 240, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.06.007>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Boote, K. J. (2017). Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field Crops Research*, 200, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.004>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Boote, K. J. (2018). Sensitivity and requirement of improvements of four soybean crop simulation models for climate change studies in Southern Brazil. *International Journal of Biometeorology*, 62(5), 823–832. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1483-1>
- Battisti, R., Sentelhas, P. C., Pilau, F. G., Wollmann, C. A. (2013). Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. *Ciência Rural*, 43(3), 390–396. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000300003>
- Berghuijs, H. N. C., Weih, M., van der Werf, W., Karley, A. J., Adam, E., Villegas-Fernández, Á. M., Kiær, L. P., Newton, A. C., Scherber, C., Tavoletti, S., Vico, G. (2021). Calibrating and testing APSIM for wheat-faba bean pure cultures and intercrops across Europe. *Field Crops Research*, 264, 108088. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108088>
- Bhatia, V. S., Singh, P., Wani, S. P., Chauhan, G. S., Rao, A. V. R. K., Mishra, A. K., Srinivas, K. (2008). Analysis of potential yields and yield gaps of rainfed soybean in India using CROPGRO-Soybean model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(8–9), 1252–1265. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.03.004>
- Bhattacharya, A. (2019). Global Climate Change and Its Impact on Agriculture. In *Changing Climate and Resource Use Efficiency in Plants*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816209-5.00001-5>
- Boote, K. J., Jones, J. W., Hoogenboom, G., Pickering, N. B. (1998). The CROPGRO model for grain legumes. In *Understanding Options for Agricultural Production* (Vol. 7, p. 99–128). https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_6
- Bosi, C., Sentelhas, P. C., Pezzopane, J. R. M., Santos, P. M. (2020). CROPGRO-

- Perennial Forage model parameterization for simulating Piatã palisade grass growth in monoculture and in a silvopastoral system. *Agricultural Systems*, 177(May 2019), 102724. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102724>
- Camargo, G. G. T., Kemanian, A. R. (2016). Six crop models differ in their simulation of water uptake. *Agricultural and Forest Meteorology*, 220, 116–129. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.01.013>
- Cardozo, N. P., Bordonal, R. O., Scala Jr, N. L. (2018). Sustainable intensification of sugarcane production under irrigation systems, considering climate interactions and agricultural efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 204, 861–871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.004>
- de Wit, A., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., Supit, I., van der Wijngaart, R., van Diepen, K. (2019). 25 years of the WOFOST cropping systems model. *Agricultural Systems*, 168, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.018>
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. (2018). Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>
- Elli, E. F., Sentelhas, P. C., Freitas, C. H., Carneiro, R. L., Alvares, C. A. (2019). Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. *Forest Ecology and Management*, 450, 117493. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117493>
- Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., Hsiao, T. C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>
- Funatsu, B. M., Dubreuil, V., Racapé, A., Debortoli, N. S., Nasuti, S., Le Tourneau, F. M. (2019). Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. *Global Environmental Change*, 57(May), 101923. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2019.05.007>
- Gaydon, D. S., Balwinder-Singh, Wang, E., Poulton, P. L., Ahmad, B., Ahmed, F., Akhter, S., Ali, I., Amarasingha, R., Chaki, A. K., Chen, C., Choudhury, B. U., Darai, R., Das, A., Hochman, Z., Horan, H., Hosang, E. Y., Kumar, P. V., Khan, A. S. M. M. R., ... Roth, C. H. (2017). Evaluation of the APSIM model in cropping systems of Asia. *Field Crops Research*, 204, 52–75. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.015>
- Hadebe, S. T., Mabhaudhi, T., Modi, A. T. (2020). Sorghum best practice management

- recommendations based on AquaCrop modeling scenario analysis in various agro-ecologies of KwaZulu Natal, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 102866. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102866>
- Hochman, Z., Gobbett, D., Horan, H., Garcia, J. N. (2016). Data rich yield gap analysis of wheat in Australia. *Field Crops Research*, 197, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.017>
- Holworth, D. P., Huth, N. I., de Voil, P. G., Zurcher, E. J., Herrmann, N. I., McLean, G., Chenu, K., van Oosterom, E. J., Snow, V., Murphy, C., Moore, A. D., Brown, H., Whish, J. P. M., Verrall, S., Fainges, J., Bell, L. W., Peake, A. S., Poulton, P. L., Hochman, Z., ... Keating, B. A. (2014). APSIM – Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. *Environmental Modelling & Software*, 62, 327–350. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.07.009>
- Holworth, D. P., Snow, V., Janssen, S., Athanasiadis, I. N., Donatelli, M., Hoogenboom, G., White, J. W., Thorburn, P. (2015). Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects *. *Environmental Modelling and Software*, 72, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.013>
- Holworth, D., Huth, N. I., Fainges, J., Brown, H., Zurcher, E., Cichota, R., Verrall, S., Herrmann, N. I., Zheng, B., Snow, V. (2018). APSIM Next Generation: Overcoming challenges in modernising a farming systems model. *Environmental Modelling & Software*, 103, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.02.002>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Wilkens, P. W., Singh, U., Gijsman, A. J., Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 235–265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- Karimi, V., Karami, E., Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61794-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61794-5)
- Karuku, G. N., Mbindah, B. A. (2020). Validation of aquacrop model for simulation of rainfed bulb onion (*Allium cepa* L.) yields in west ugenya sub-county, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(06), 1–11.
- Keating, B., Carberry, P., Hammer, G., Probert, M., Robertson, M., Holzworth, D., Huth,

- N., Hargreaves, J. N., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K., Asseng, S., Smith, C. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 267–288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- Khaliq, T., Gaydon, D. S., Ahmad, M. D., Cheema, M. J. M., Gull, U. (2019). Analyzing crop yield gaps and their causes using cropping systems modelling—A case study of the Punjab rice-wheat system, Pakistan. *Field Crops Research*, 232, 119–130. <https://doi.org/10.1016/J.FCR.2018.12.010>
- Lamichhane, J. R., Constantin, J., Aubertot, J. N., Dürr, C. (2019). Will climate change affect sugar beet establishment of the 21st century? Insights from a simulation study using a crop emergence model. *Field Crops Research*, 238, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.04.022>
- Leng, G., Zhang, X., Huang, M., Asrar, G. R., Leung, L. R. (2016). The Role of Climate Covariability on Crop Yields in the Conterminous United States OPEN. *Nature Publishing Group*. <https://doi.org/10.1038/srep33160>
- Makuvaro, V., Walker, S., Masere, T. P., Dimes, J. (2018). Smallholder farmer perceived effects of climate change on agricultural productivity and adaptation strategies. *Journal of Arid Environments*, 152, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.01.016>
- Manivasagam, V. S., Rozenstein, O. (2020). Practices for upscaling crop simulation models from field scale to large regions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105554. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105554>
- Martini, L. C. P. (2018). Sensitivity analysis of the AquaCrop parameters for rainfed corn in the South of Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(8), 934–942. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2018000800008>
- Martins, M. A., Tomasella, J., Dias, C. G. (2019). Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. *Agricultural Water Management*, 216(August 2018), 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011>
- Martins, M. A., Tomasella, J., Rodriguez, D. A., Alvalá, R. C. S., Giarolla, A., Garofolo, L. L., Júnior, J. L. S., Paolicchi, L. T. L. C., Pinto, G. L. N. (2018). Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, 160, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.002>
- McCown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D., Huth, N. I. (1995). APSIM: an agricultural production system simulation model for operational research.

- Mathematics and Computers in Simulation*, 39(3–4), 225–231.
[https://doi.org/10.1016/0378-4754\(95\)00063-2](https://doi.org/10.1016/0378-4754(95)00063-2)
- Mccown, R. L., Hammer, G. L., Hargreaves, J. N. G., Holzworth, D. P., Freebairn, D. M. (1996). APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research. *Agricultural Systems*, 50, 255–271.
[https://pdf.sciencedirectassets.com/271139/1-s2.0-S0308521X00X00042/1-s2.0-0308521X9400055V/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEMr%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIEtI3s3TV7Tuiebb0yQd62ELbuHpMWe69ch5AhF5wtC4AiEAxFFTRZzz2E5VP](https://pdf.sciencedirectassets.com/271139/1-s2.0-S0308521X00X00042/1-s2.0-0308521X9400055V/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEMr%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIEtI3s3TV7Tuiebb0yQd62ELbuHpMWe69ch5AhF5wtC4AiEAxFFTRZzz2E5VP)
- Minoli, S., Egli, D. B., Rolinski, S., Müller, C. (2019). Modelling cropping periods of grain crops at the global scale. *Global and Planetary Change*, 174, 35–46.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.12.013>
- Mohanty, M., Probert, M. E., Reddy, K. S., Dalal, R. C., Mishra, A. K., Rao, A. S., Singh, M., Menzies, N. W. (2012). Simulating soybean-wheat cropping system: APSIM model parameterization and validation. *“Agriculture, Ecosystems and Environment”*, 152, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.02.013>
- Monteiro, L. A., Sentelhas, P. C. (2014). Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 36(3), 265. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v36i3.17485>
- Morel, J., Kumar, U., Ahmed, M., Bergkvist, G., Lana, M., Halling, M., Parsons, D. (2021). Quantification of the Impact of Temperature, CO₂, and Rainfall Changes on Swedish Annual Crops Production Using the APSIM Model. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(May), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.665025>
- Neset, T. S., Wiréhn, L., Opach, T., Glaas, E., Linnér, B. O. (2019). Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: The case of Swedish agriculture. *Ecological Indicators*, 105(June 2018), 571–580.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.042>
- Nóia Júnior, R. S., Sentelhas, P. C. (2019). Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. *European Journal of Agronomy*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.008>
- Palit, P., Kudapa, H., Zougmore, R., Kholova, J., Whitbread, A., Sharma, M., Varshney, R. K. (2020). An integrated research framework combining genomics, systems biology, physiology, modelling and breeding for legume improvement in response to elevated CO₂ under climate change scenario. *Current Plant Biology*, 22, 100149.

- <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100149>
- Palosuo, T., Hoffmann, M. P., Rötter, R. P., Lehtonen, H. S. (2021). Sustainable intensification of crop production under alternative future changes in climate and technology: The case of the North Savo region. *Agricultural Systems*, *190*, 103135. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103135>
- Pedreira, B. C., Pedreira, C. G. S., Boote, K. J., Lara, M. A. S., Alderman, P. D. (2011). Adapting the CROPGRO perennial forage model to predict growth of *Brachiaria brizantha*. *Field Crops Research*, *120*(3), 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.010>
- Pequeno, D. N. L., Pedreira, C. G. S., Boote, K. J., Alderman, P. D., Faria, A. F. G. (2018). Species-genotypic parameters of the CROPGRO Perennial Forage Model: Implications for comparison of three tropical pasture grasses. *Grass and Forage Science*, *73*(2), 440–455. <https://doi.org/10.1111/gfs.12329>
- Pirmoradian, N., Davatgar, N. (2019). Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural Water Management*, *213*, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, *101*(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Sandhu, R., Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, *223*, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- Santos, M. G., Faria, R. T., Palaretti, L. F., Dantas, G. D. F., Dalri, A. B., Lopes, A. D. S. (2016). Calibration and testing of CS-CROPGRO Model for Common Beans. *Engenharia Agrícola*, *36*(6), 1239–1249. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n6p1239-1249/2016>
- Scheelbeek, P. F. D., Bird, F. A., Tuomisto, H. L., Green, R., Harris, F. B., Joy, E. J. M., Chalabi, Z., Allen, E., Haines, A., Dangour, A. D. (2018). Effect of environmental changes on vegetable and legume yields and nutritional quality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *115*(26), 6804–6809. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800442115>
- Silva, E. H. F. M., Antolin, L. A. S., Zanon, A. J., Andrade, A. S., Souza, H. A., Carvalho, K. S., Vieira, N. A., Marin, F. R. (2021). Impact assessment of soybean yield and water productivity in Brazil due to climate change. *European Journal of Agronomy*, *129*, 89

126329. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126329>
- Singh, S., Boote, K. J., Angadi, S. V., Grover, K. K. (2017). Estimating water balance, evapotranspiration and water use efficiency of spring safflower using the CROPGRO model. *Agricultural Water Management*, 185, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.015>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), 189–207. <https://doi.org/10.1007/s00271-007-0064-1>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Takatani, N., Ito, T., Kiba, T., Mori, M., Miyamoto, T., Maeda, S. I., Omata, T. (2014). Effects of High CO₂ on Growth and Metabolism of Arabidopsis Seedlings During Growth with a Constantly Limited Supply of Nitrogen. *Plant and Cell Physiology*, 55(2), 281–292. <https://doi.org/10.1093/pcp/pct186>
- Tooley, B. E., Mallory, E. B., Porter, G. A., Hoogenboom, G. (2021). Predicting the response of a potato-grain production system to climate change for a humid continental climate using DSSAT. *Agricultural and Forest Meteorology*, 307, 108452. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108452>
- van Bussel, L. G. J., Müller, C., van Keulen, H., Ewert, F., Leffelaar, P. A. (2011). The effect of temporal aggregation of weather input data on crop growth models' results. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(5), 607–619. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.01.007>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Wang, X., Wang, H., Si, Z., Gao, Y., Duan, A. (2020). Modelling responses of cotton growth and yield to pre-planting soil moisture with the CROPGRO-Cotton model for a mulched drip irrigation system in the Tarim Basin. *Agricultural Water Management*, 241(July), 106378. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106378>
- Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., Wei, Z. (2019). Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.028>

Zhao, C., Liu, B., Xiao, L., Hoogenboom, G., Boote, K. J., Kassie, B. T., Pavan, W., Shelia, V., Kim, K. S., Hernandez-Ochoa, I. M., Wallach, D., Porter, C. H., Stockle, C. O., Zhu, Y., Asseng, S. (2019). A SIMPLE crop model. *European Journal of Agronomy*, 104(February), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.01.009>

CAPÍTULO III

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA
ARRANJOS PRODUTIVOS DE PLANTAS FORRAGEIRAS CACTÁCEAS E
GRAMÍNEAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO**

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA ARRANJOS PRODUTIVOS DE PLANTAS FORRAGEIRAS CACTÁCEAS E GRAMÍNEAS EM AMBIENTE SEMIÁRIDO

Resumo: O conhecimento das melhores estratégias do cultivo de plantas forrageiras é importante para equilíbrio da pecuária, juntamente com o aprimoramento de técnicas de manejo visando o aumento produtivo de alimentos. Com isso, os modelos de simulação do crescimento de plantas são ferramentas importantes para o planejamento agrícola. Assim, objetivou-se, calibrar e validar o modelo AquaCrop para sistemas agrícolas com cultivos de palma forrageira, milho e sorgo sob diferentes arranjos produtivos. Doze unidades produtivas foram conduzidas no período de 2019 a 2020, com distintos clones de palma, e cultivares de milho e sorgo sob variações na configuração de cultivo, cobertura do solo, regimes hídricos e densidades de cultivo. Foram observados dados das culturas (fenologia, biometria e biomassa ao longo do ciclo e produtividade na colheita), clima, irrigação, solo e manejo. Ao todo, foram utilizados dados de seis unidades produtivas para a calibração e seis para a validação. O desempenho do modelo foi avaliado por meio de índices estatísticos. O AquaCrop resultou em erros admissíveis na predição da produtividade das culturas avaliadas, apresentando desempenho muito bom ($c > 0,80$) e coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,80. O clone OEM apresentou a maior *WP* média (39 g m^{-2}). Concluiu-se que o modelo pode ser empregado na simulação da produtividade das culturas sob diferentes arranjos de cultivo em ambientes agrícolas no semiárido do Brasil visando suprir o déficit forrageiro da pecuária na região.

Palavras-chave: estratégias de cultivo, modelagem, pecuária, forragem, resiliência agrícola.

CALIBRATION AND VALIDATION OF THE AQUACROP MODEL FOR PRODUCTION ARRANGEMENTS OF CACTACEOUS AND GRASS FORAGE PLANTS IN SEMI-ARID ENVIRONMENT

Abstract: Knowledge of the best strategies for growing forage crops is important for the balance of livestock, together with the improvement of management techniques aimed at increasing food production. Thus, plant growth simulation models are important tools for agricultural planning. Thus, the objective was to calibrate and validate the AquaCrop model for agricultural systems with cactus pear, millet and sorghum under different production arrangements. Twelve production units were conducted from 2019 to 2020, with different cactus forage, millet and sorghum cultivars under variations in crop configuration, soil cover, water regimes and crop densities. Crop data (phenology, biometry and biomass throughout the cycle and productivity at harvest), climate, irrigation, soil and management were observed. In all, data from six production units were used for calibration and six for validation. The model's performance was evaluated using statistical indices. AquaCrop resulted in admissible errors in predicting the productivity of the evaluated crops, showing very good performance ($c > 0.80$) and a coefficient of determination (R^2) greater than 0.80. The OEM clone had the highest average WP (39 g m⁻²). It was concluded that the model can be used to simulate the productivity of crops under different cultivation arrangements in agricultural environments in the semiarid region of Brazil, aiming to supply the forage deficit of livestock in the region.

Keywords: cultivation strategies, modeling, livestock, forage, agricultural resilience.

Introdução

A atividade pecuária no Brasil responde por 31% do Produto Interno Bruto (PIB), além disso garante maior estabilidade econômica à população quando comparada com a agricultura, sobretudo na região semiárida do país (Moraes et al., 2019; Veloso et al., 2020). Nessa região, o déficit hídrico e suas variações interanuais associado ao manejo agrícola ineficiente afetam a produção de forragem em anos com a ocorrência de anomalias climáticas e no período de maior escassez hídrica (Er-Raki et al. 2021; Silva et al. 2021).

Nesse contexto, o conhecimento de alternativas produtivas é fundamental para garantir o aumento da oferta de forragem aos rebanhos. Dentre elas, a seleção de plantas forrageiras resilientes e com potencial produtivo ajudam a mitigar parte das adversidades edafoclimáticas (Mudgal et al., 2018). Espécies como a palma forrageira, sorgo e o milho podem reduzir o déficit na demanda de forragem no semiárido brasileiro (Jardim et al., 2021; Pinheiro et al., 2022).

A palma (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) produz grande quantidade de matéria verde por unidade de área com alta palatabilidade e valor energético, mesmo em condições ambientais limitantes para outras forrageiras; essa característica é atribuída ao seu metabolismo ácido das crassuláceas (MAC) que permite a planta a fechar os estômatos durante o período diurno, e a noite abre para assimilação do dióxido carbono, proporcionando maior eficiência no uso da água (Araújo Júnior et al. 2021; Dubeux et al. 2021; Pessoa et al. 2020). O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e o milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) são culturas de metabolismo C₄, que assimilam CO₂ no período diurno e exibem elevado potencial de produção de biomassa, alto retorno econômico, além de possuírem alta tolerância ao déficit hídrico e eficiência no uso da água (Taylor, 2019; Jardim et al. 2021; Lauriault et al. 2021).

Além da escolha de culturas forrageiras adaptadas ao clima semiárido, a produção de forragem pode ser maximizada mediante a adoção de manejos agrícolas que otimizem o uso da terra e a eficiência no uso da água (Araújo Júnior, et al., 2021; Souza et al., 2022; Jardim et al., 2021). A consorciação entre culturas, uso de irrigação e cobertura morta, e intensificação da densidade de plantio podem promover maior produção de biomassa (Nyakudya e Stroosnijder 2014; Diniz et al. 2017; Lima et al. 2018; Jardim et al. 2021; Mupangwa et al., 2012).

A compreensão da eficiência das culturas agrícolas sob distintas práticas de manejo em uma diversidade de condições de clima e solo requer investimentos onerosos em

pesquisas e demanda de tempo. Portanto, o uso de ferramentas capazes de auxiliar no manejo agrícola e na simulação da produtividade é uma importante estratégia para o planejamento e a tomada de decisão, além disso, reduz a vulnerabilidade aos riscos climáticos (Kanda et al., 2021; Nunes et al., 2021). Modelos de simulação do crescimento de plantas são representações matemáticas de cenários que englobam a combinação dos efeitos do ambiente e do manejo (Adeboye et al., 2020; Chibarabada et al., 2020; Nunes et al., 2021), e auxiliam na criação de cenários de estratégias, calendários agrícolas e previsão de colheita sob condições de clima atual e futuro (Karuku e Mbindah, 2020; Martins et al., 2018).

Nesse sentido, o modelo AquaCrop (Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2009), desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO), é uma ferramenta agroclimática que permite mensurar o efeito das condições climáticas sobre o desempenho produtivo e a quebra de produtividade de culturas agrícolas sob uma variação de condições hídricas, como sequeiro, irrigação suplementar, déficit hídrico e irrigação plena. A sua interface permite conciliar a simplicidade com a precisão e estabilidade, além disso, os seus parâmetros de entrada são mais intuitivos comparado a outros modelos de simulação (Karuku e Mbindah, 2020; Pinheiro et al., 2021).

O modelo AquaCrop foi parametrizado e utilizado por diversos estudos na simulação de culturas agrícolas com metabolismo C_3 e C_4 , dentre elas o sorgo (Araya et al., 2016; Hadebe et al., 2017) e o milho (Bello e Walker, 2016; Guo et al., 2018). No entanto, ainda são inexistentes os estudos do uso do modelo para culturas com metabolismo MAC (palma forrageira) e sua interação com outras culturas e arranjos agrícolas, além da necessidade de aplicação do modelo em condições ambientais para a região do semiárido brasileiro.

O conhecimento dessas informações e aplicação dessa ferramenta nos cenários agrícolas é de extrema relevância nas tomadas de decisões, otimizando recursos e elevando os rendimentos.

Com isso, este estudo tem como hipótese a consistência e eficiência do modelo AquaCrop a partir da calibração e validação para as diferentes culturas forrageiras e arranjos produtivos e, com isso, identificar as principais limitações do modelo. Assim, objetivou-se calibrar e validar o modelo AquaCrop para sistemas agrícolas com cultivos de palma forrageira, milho e sorgo sob diferentes arranjos produtivos.

Material e métodos

Área experimental e coleta de dados

O estudo foi conduzido no campo experimental “Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras”, localizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, município de Serra Talhada, PE, Brasil (7°56'20" S; 38°17'31" O e 499 m) (Figura 1).

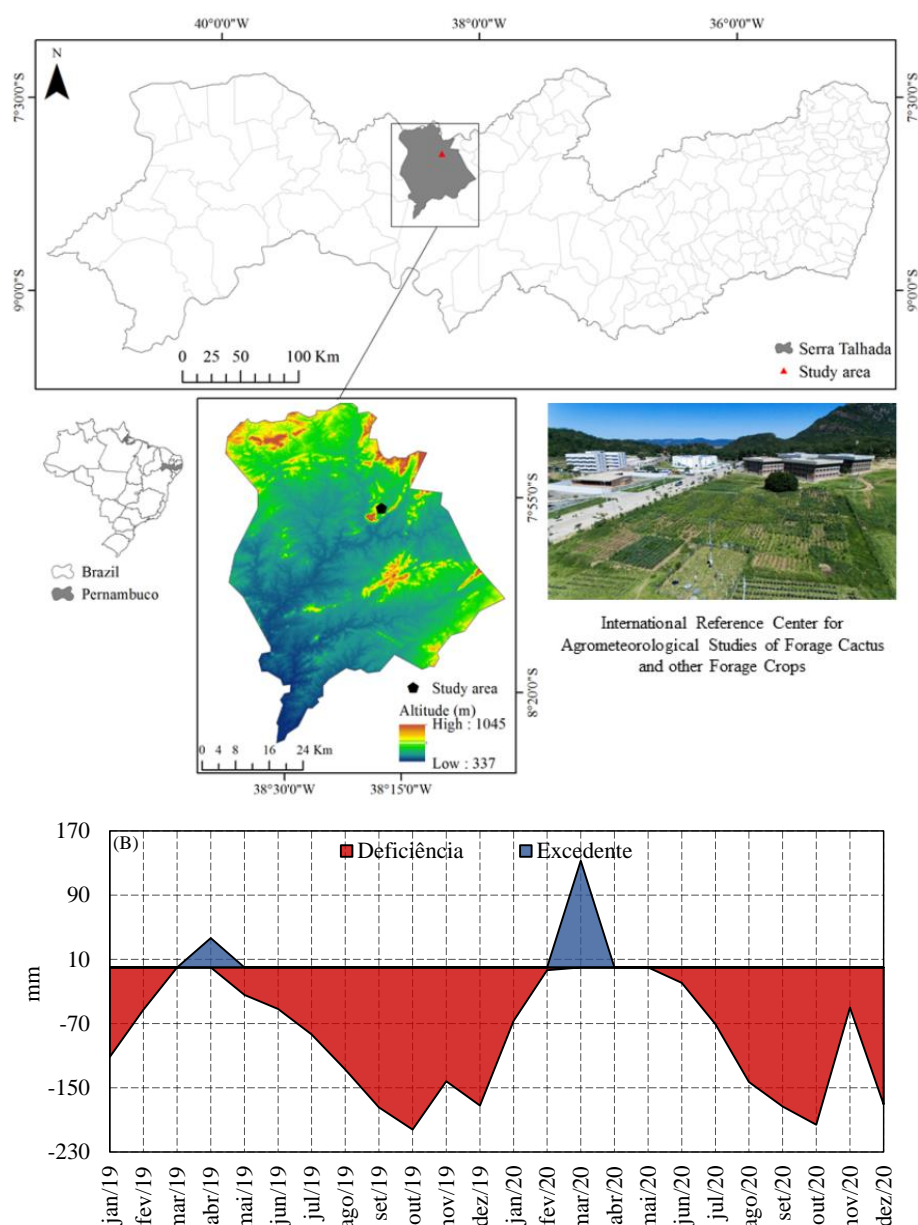


Figura 1. Localização do “Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras” (A), balanço hídrico climatológico entre 2019 e 2020 (B), município de Serra Talhada, PE, Brasil.

O clima da região é do tipo BSh, semiárido com chuvas concentradas nos meses mais quentes, de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com médias de temperatura máxima e mínima do ar variando entre 20,1 a 32,9 °C, precipitação pluvial média de 642 mm ano⁻¹, umidade relativa média do ar de 63% e demanda atmosférica superior a 1.800 mm ano⁻¹ (Pereira et al., 2015).

O solo da área de estudo foi classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico (Santos et al., 2018), de textura areia franca, bem drenado e não pedregoso, com propriedades físicas e químicas representadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades físico-químicas do solo Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico na camada 0,00 – 0,80 m no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.

Propriedades físicas do solo											
ρ_s	ϕ_t	Areia	Silte	Argila							
$g\ cm^{-3}$	%	.....	$g\ kg^{-1}$	.....						
1.35	45.45	801.41	149.07	51.27							
Propriedades químicas do solo											
pH	CE	P	CO	MO	Ca	K	Na	Mg	SB	CTC	V
	$dS\ m^{-1}$	$mg\ dm^{-1}$	.....	$g\ kg^{-1}$	.....	.....	$cmol_c\ dm^{-3}$	.....	.....	.....	%
6.27	0.74	74.86	5.30	9.15	3.25	0.05	0.04	1.45	4.81	7.12	73.87

Arranjos experimentais

Neste estudo, 57 arranjos experimentais foram conduzidos simultaneamente em 12 unidades produtivas, das quais seis unidades foram usadas na etapa de calibração do modelo AquaCrop e seis campos usadas na etapa de validação. A duração dos ensaios de 12 a 15 meses variou conforme o arranjo agrícola. Os dados meteorológicos e irrigação ao longo dos ciclos dos cultivos são demonstrados na Figura 2.

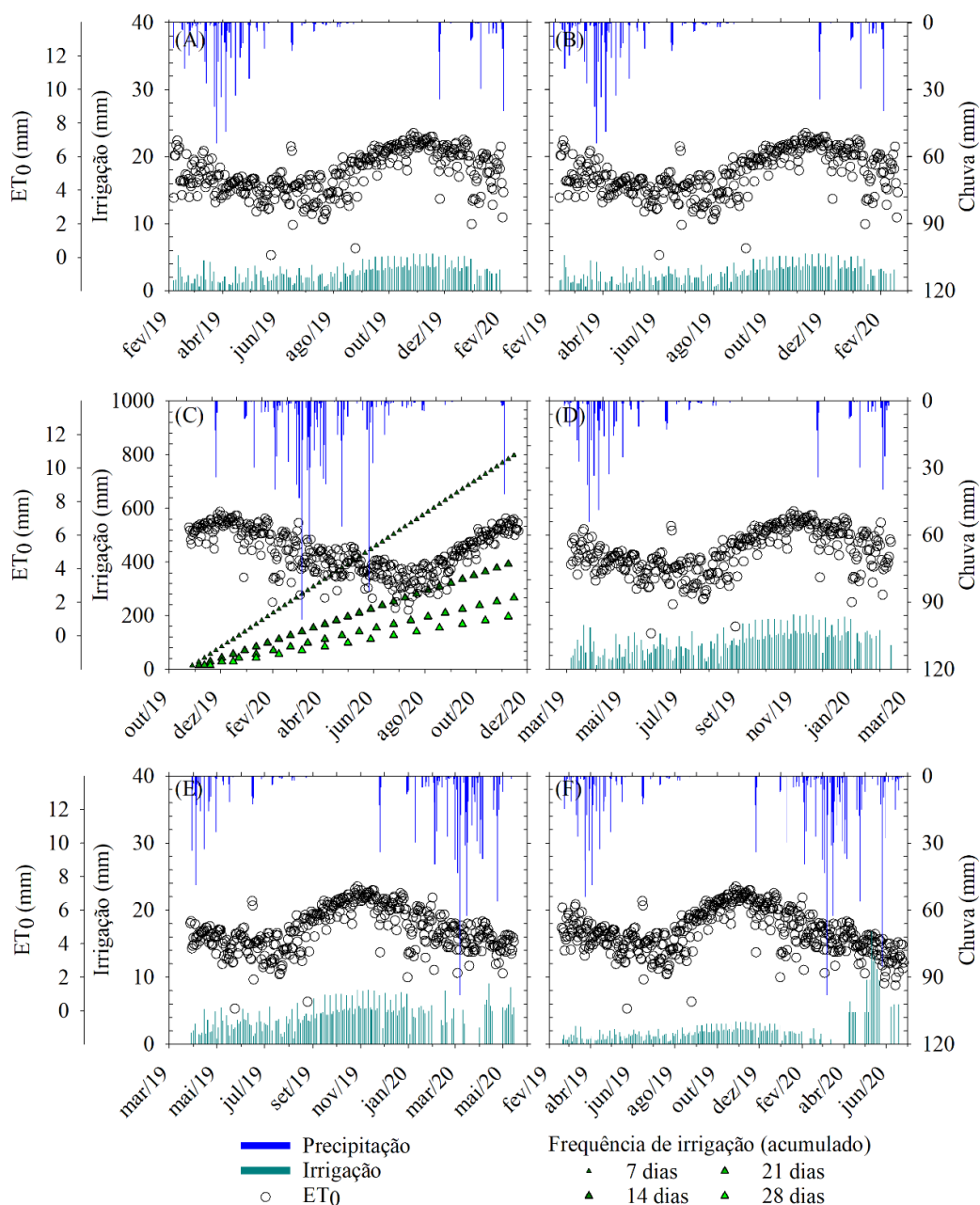


Figura 2. Dados meteorológicos e de irrigação durante os ciclos agrícolas das seguintes unidades produtivas: cultivos irrigados exclusivos e consorciados de clones de palma e cultivares de sorgo (A); clones de palma em sequeiro e irrigados com base na fração de 40%, 80% e 120% da ET_c (evapotranspiração da cultura) (B); clones de palma irrigados com frequências de 7, 14, 21 e 28 dias (C); plantios irrigados exclusivos e consorciados de palma e milho com e sem uso de cobertura morta (D); clones de palma sob irrigação complementar (E); consorciação de palma irrigada com sorgo e milho (F).

Unidade produtiva 1: Cultivos exclusivos e consorciados de palma e sorgo

Três clones de palma forrageira IPA Sertânia (IPA) [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck], miúda (MIU) [*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck] e Orelha de Elefante

Mexicana (OEM) [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.] e três cultivares de sorgo (SF11, IPA 467 e Progenitor - 288) foram combinados em 15 arranjos de cultivo, sendo em consórcio (IPA-SF11, IPA-467, IPA-P288, MIU-SF11, MIU-467, MIU-P288, OEM-SF11, OEM-467, OEM-P288) e de forma exclusiva (IPA-EXC, MIU-EXC, OEM-EXC, SF11-EXC, 467-EXC, P288-EXC).

O plantio da palma foi realizado com a inserção de 50% do cladódio no solo com espaçamentos de 1,0 m (entre linhas) e 0,2 m (entre plantas) (50.000 plantas ha⁻¹), totalizando a área da parcela em 20 m². O plantio foi realizada em janeiro de 2017 e foi conduzido no 2º ciclo produtivo, entre 6 de fevereiro de 2019 e 4 de fevereiro de 2020. Por sua vez, o semeio das cultivares de sorgo foi realizado em sulcos de 0,05 m de profundidade, distanciando-se 0,25 m da palma forrageira e mantendo-se 20 plantas por metro linear (densidade equivalente de 200.000 plantas ha⁻¹).

A irrigação foi baseada em 120% da evapotranspiração da palma (considerada com a cultura principal), por meio de um sistema por gotejamento com coeficiente de uniformidade igual a 92% a uma pressão de 100 kPa. A condutividade elétrica média da água foi de 1,62 dS m⁻¹, classificada como C3 (alta salinidade) de acordo com a classificação de Richards (1954), com pH de 6,84 e concentração de sódio e potássio de 168,66 mg L⁻¹ e 28,17 mg L⁻¹, respectivamente.

Unidade produtiva 2: Clones de palma sob distintos regimes hídricos

Três clones de palma (IPA, MIU e OEM) cultivados em sistema exclusivo foram plantados em espaçamento de 1,0 x 0,2 m (50.000 plantas ha⁻¹), com 50% dos cladódios enterrados, e conduzidos em sequeiro e a irrigação complementar com base na fração da evapotranspiração da cultura (ET_c): 0, 40, 80 e 120% ET_c. Os clones OEM, MIU e IPA foram submetidos as mesmas condições de sequeiro e as três lâminas de irrigação. A área foi implantada em janeiro de 2016 e este estudo conduzido no segundo ciclo produtivo, entre 15 de março de 2019 e 11 de maio de 2020, quando ocorreu a colheita.

Unidade produtiva 3: Clones de palma sob distintas frequências de irrigação

A área produtiva foi com três clones de palma (IPA, MIU e OEM) e irrigações com lâminas fixas de 14 mm realizadas com base em frequências: 7, 14, 21 e 28 dias, ou seja, 12 tratamentos. Os clones foram plantados em espaçamento de 1,0 x 0,2 m (50.000 plantas ha⁻¹), com 50% dos cladódios enterrados. A área foi implantada em janeiro de

2016 e para este estudo foram usados os dados coletados, entre 05 de setembro de 2019 e 25 de novembro de 2020, conduzido no segundo ciclo produtivo.

Unidade produtiva 4: Consórcio palma -milheto com e sem cobertura morta

Este sistema foi disposto com dois níveis de cobertura, sem e com cobertura morta (15 Mg ha^{-1}) e três arranjos de plantio: palma forrageira exclusiva (OEM), milheto exclusivo (IPA Bulk-1-BF) e o consórcio entre palma e milheto (OEM-Bulk), com quatro repetições. A área foi implantada em junho de 2016, com espaçamento de $1,5 \times 0,2 \text{ m}$ ($31.250 \text{ planta ha}^{-1}$), e neste estudo foram usados dados do segundo ciclo produtivo, que ocorreu entre 25 de fevereiro de 2019 (mantendo-se os cladódios de primeira ordem da cactácea) e 12 de fevereiro de 2020. Durante o estudo foi realizado o manejo de irrigação, com reposição hídrica de 120% da ET_c da palma.

Unidade produtiva 5: Clones de palma sob irrigação complementar

A área foi composta por clones de palma (IPA, MIU, OEM, V19, F8 e Orelha de Elefante Africana - OEA) sob irrigação com base na 120% ET_c da palma. A implantação dos cladódios foi realizada com espaçamento de $1,2 \times 0,2 \text{ m}$. O plantio inicial foi realizado em dezembro de 2017. Para este estudo, foram usados os dados do segundo ciclo da cultura, que iniciou em 28 de março de 2019 e ocorreu até 15 maio de 2020.

Unidade produtiva 6: Consorciação da palma com sorgo e milheto

A palma (OEM) foi implantada em 16 de abril de 2017, em espaçamento de $1,0 \times 0,1 \text{ m}$ ($100.000 \text{ plantas ha}^{-1}$). Para este estudo foram usados os dados do segundo ciclo com duração de 15 fevereiro de 2019 a 15 junho de 2020. Quatro arranjos produtivos foram adotados: palma exclusiva; palma consorciada com milheto cv. IPA Bulk-1-BF; palma com sorgo cv. IPA101; e palma com sorgo cv. IPASF15). Os consórcios (palma-milheto e palma-sorgos) foram implantados no dia 04 de fevereiro de 2019. Todas as espécies foram semeadas, em sucros com 0,05 m de profundidade, a 0,25 m do cladódio basal da palma. As cultivares de sorgo e milheto foram conduzidas com 20 plantas por metro linear.

Dados biométricos e de biomassa

As análises foram realizadas ao longo do ciclo para todas as culturas. Para as cultivares de sorgo e milho, as leituras foram realizadas em campo com periodicidades de 7 e 15 dias, para as características biométricas e de biomassa, respectivamente. Já os clones de palma forrageira, essas leituras foram realizadas a cada 30 e 90 dias, respectivamente.

Os valores biométricos do sorgo eram registrados a partir da análise métrica da área foliar (cm^2) e da área de solo ocupada por planta (cm^2), obtendo-se o Índice de Área Folia – IAF ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$). A biomassa foi determinada através da pesagem de biomassa verde e seca (Mg ha^{-1}) da parte aérea da planta (colmo + folhas + panícula).

Para os clones de palma forrageira, as leituras biométricas foram realizadas medindo-se altura da planta (cm), largura da planta (cm) e número de cladódios. Foi selecionada uma ramificação representativa da planta para análise de comprimento, largura e perímetro de todos os cladódios. Com isso, a partir da metodologia sugerida por Silva et al., (2014) foram obtidas as áreas dos cladódios (cm^2) para os diferentes clones, além do Índice de Área do Cladódio ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$), através da razão da área do cladódio e o espaçamento de cultivo (Pinheiro et al., 2014). Já para a biomassa, foram selecionadas plantas representativas por área experimental, cortadas e pesadas em balança de precisão (massa fresca, Mg ha^{-1}) e submetidas a secagem por circulação forçada de ar, com temperatura de $65\text{ }^\circ\text{C}$, para obtenção da massa seca (Mg ha^{-1}).

A partir do registro do Índice de Área Folia e de Cladódio, foi realizada o cálculo da Cobertura do Dossel (CC), através da relação com o IAF (Heng et al., 2009):

$$CC=1.005 \times [1 - \exp(-0.6 \times \text{IAF})]^{1.2} \quad (1)$$

O rendimento final para as culturas foi expresso pela biomassa (B) conforme sugerido por Raes et al. (2009) e Steduto et al. (2009).

$$B = WP \times \sum Tr \quad (2)$$

em que: B é a biomassa (Mg ha^{-1}), WP é o parâmetro de produtividade da água ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$) e Tr é a colheita mediante transpiração (mm).

Calibração e validação do modelo AquaCrop para os distintos sistemas produtivos

Dados de campo de CC e B das seis unidades produtivas foram usados na calibração do modelo AquaCrop para os diferentes arranjos produtivos. Como o modelo não realiza a simulação de sistemas de cultivos em consórcio, realizou-se a calibração das culturas de forma individualizada. Todavia, com o registro de ambas culturas, foi possível o somatório dessas e a obtenção da biomassa desse sistema.

Para os clones de palma forrageira, o AquaCrop simulou o incremento de B a partir de uma biomassa inicial ou residual, logo para a simulação da biomassa (B) dos cultivos de palma foi considerado a biomassa inicial ($B_{residual}$), equivalente ao cladódio basal usado na ocasião do plantio ou os cladódios basal e de primeira ordem mantidos no campo após as colheitas. Essa prática é muito comum para esse tipo de cultivo, logo devem ser considerados na simulação.

A etapa de calibração foi conduzida com o ajuste dos parâmetros: CGC , CDC , Z_{max} , f_{kc} , WP , $P_{exp, upper}$, $P_{exp, lower}$, P_{est} , P_{sen} (Tabela 2). Esses parâmetros são aqueles que mais apresentam sensibilidade de acordo com as condições específicas das culturas, ambientes e manejos (Guo et al., 2019; Jin et al., 2018; Upreti et al., 2020; Vanuytrecht et al., 2014; Xing et al., 2017). Esses parâmetros foram continuamente ajustados até os valores simulados de CC e B simulados se aproximarem dos valores observados em campo, de modo que se obtivesse os melhores resultados dos índices estatísticos. De modo geral, a simulação realizada pelo modelo AquaCrop ocorreu de acordo com as etapas descritas na Figura 3.

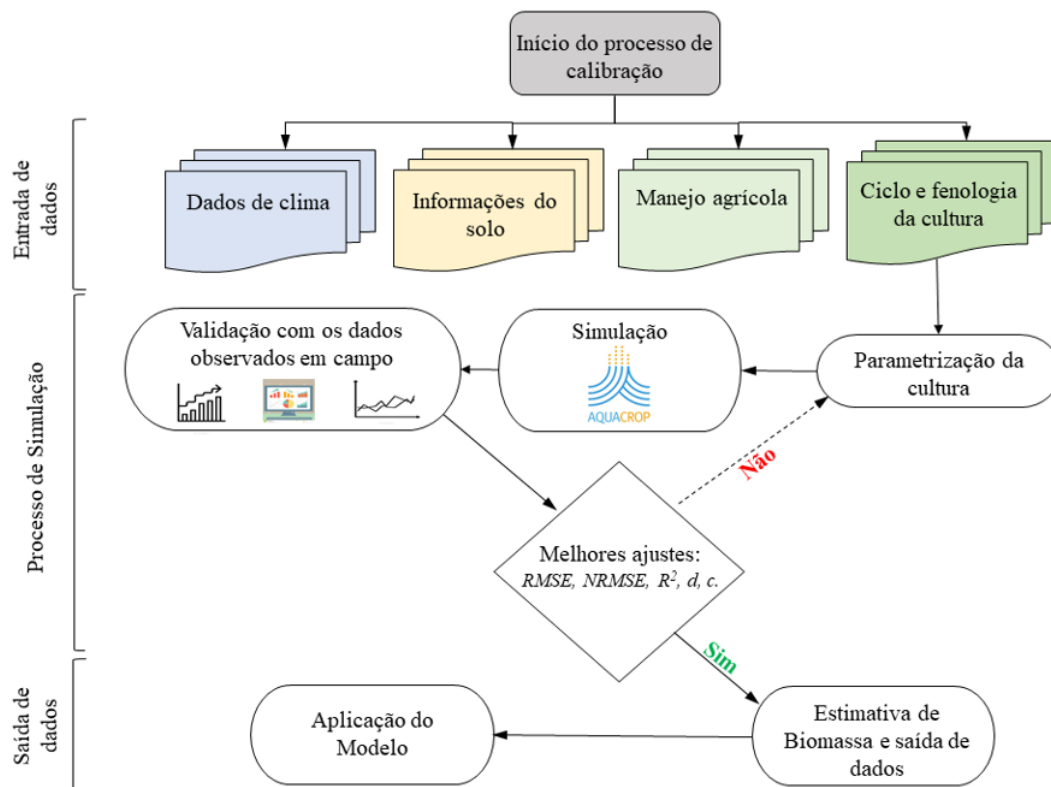


Figura 3. Fluxograma do processo de simulação do Modelo AquaCrop.

Inicialmente foram adicionados os dados de entradas de clima, solo, manejo agrícola e características fenológicas e de ciclo da cultura de interesse. Em seguida foram adicionados os parâmetros conservativos e de manejo da cultura, com valores iniciais de acordo com os dados ou comportamentos observados em campo ou mediante dados importados de trabalhos publicados com características semelhantes.

Os parâmetros considerados no modelo a AquaCrop são demonstrados na Tabela 2. A definição do coeficiente de expansão do dossel (CGC) e do coeficiente de declínio do dossel (CDC) foi realizada a partir da análise do desenvolvimento da cobertura do dossel (CC) em campo, quando obtidos os melhores índices estatísticos, definindo-se o tempo necessário para a cultura cobrir todo o solo. Já os parâmetros referentes ao estresse hídrico (Tabela 2) foram ajustados conforme a resposta produtiva da cultura observada em campo. A calibração desses parâmetros foi realizada pelo método de tentativa e erro, ajustando-se os valores dentre os limites superiores e inferiores, fator de forma da curva, além do parâmetro referente à senescência foliar (K_s) até a obtenção das menores diferenças estatísticas entre a produção de biomassa seca simulada e real ao longo do ciclo vegetativo das culturas (Abedinpour et al., 2012; Araya et al., 2010; Paredes & Torres, 2017).

Tabela 2. Parâmetros iniciais utilizados na calibração do modelo *AquaCrop*

Símbolo	Descrição	Tipo
Temperatura do ar		
T_b	Temperatura basal (°C)	Conservativo
T_B	Temperatura máxima (°C)	Conservativo
Desenvolvimento do dossel		
	Tempo entre plantio e emergência (dias ou °C dia ⁻¹)	Manejo
	Número de plantas por hectare	Manejo
CC_o	Cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%)	Não conservativo
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel (relação da cobertura do solo por dia ou °C dia ⁻¹)	Não conservativo
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%)	Manejo
	Tempo do plantio até o início da senescência (dias ou °C dia ⁻¹)	Conservativo
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (Relação da cobertura do solo por dia ou °C dia ⁻¹)	Não conservativo
	Tempo entre semeadura e maturação (dias ou °C dia ⁻¹)	Não conservativo
Desenvolvimento da zona radicular		
Z_{min}	Profundidade radicular mínima efetiva (m)	Manejo
Z_{max}	Profundidade radicular máxima efetiva (m)	Manejo
-	Fator de expansão da zona radicular	Não conservativo
-	Tempo entre semeadura e máxima profundidade radicular	Manejo
Transpiração da cultura		
Kcb_x	Coefficiente da cultura com máxima expansão do dossel	Conservativo
f_{kc}	Coefficiente de declínio da cultura como resultado da idade, deficiência de nitrogênio, etc. (% dia ⁻¹)	Não conservativo
	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no final do ciclo	Não conservativo
Produção de biomassa e rendimento		
WP^*	Produtividade de água normalizada para ET ₀ e CO ₂ (g m ⁻²)	Não conservativo
Índice de colheita		
HI_0	Índice de colheita de referência	Não conservativo
Estresse hídrico		
$P_{exp, upper}$	Limite superior da depleção da água no solo para a expansão do dossel	Não conservativo
$P_{exp, lower}$	Limite inferior da depleção da água no solo para a expansão do dossel	Não conservativo
-	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel	Não conservativo
P_{est}	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático	Não conservativo
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	Não conservativo
P_{sen}	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel	Não conservativo
	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel	Não conservativo
Estresse pela temperatura do ar		
	Mínimo de graus-dias necessários para a produção de biomassa total (°C dia ⁻¹)	Conservativo

Fonte: (Hadebe et al., 2017; Heng et al., 2009).

Realizou-se a primeira simulação dos valores de CC e B , os quais foram comparados com os dados de campo em um procedimento de auto validação, mediante diagnóstico estatístico.

Em resposta a dispersão dos dados simulados e observados, reajustou-se os parâmetros não conservativos a fim de reduzir os erros. Novas simulações foram procedidas até obtenção dos menores erros relativos e absolutos. Para a validação dos parâmetros calibrados foram utilizados dados de seis campos experimentais independentes. Nessa etapa foram considerados os dados de manejo de cada campo experimental, clima, solo e manejo.

Análise estatística das simulações

As diferenças entre os dados simulados e observados de CC e B foram avaliadas por meio dos seguintes índices estatísticos: raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Browne e Cudeck, 1992); erro quadrático médio normalizado (NRMSE); coeficiente de determinação (R^2), que evidencia o grau de dependência entre a variável predita e a preditora; índice de concordância (d) (Willmott, 1982), que representa a precisão do modelo e o Índice de Confiança (c) (Camargo e Sentelhas, 1997).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2} \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{R}} \times 100 \quad (4)$$

$$R^2 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n [(R_i - \bar{R}) \times (S_i - \bar{S})]^2 \right\}}{\left[\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \right] \times \left[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]} \quad (5)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{R}| + |R_i - \bar{R}|)^2} \quad (6)$$

$$c = r \times d \quad (7)$$

em que: R_i e S_i são as produtividades reais e simuladas ao longo do ciclo, respectivamente; \bar{R} e \bar{S} são as produtividades médias reais e simuladas; e n é o número de amostras.

O RMSE é usado para mensurar o desempenho geral do modelo e expressa a discrepância média entre os valores simulados e observados. O modelo exhibe os melhores ajustes quando o RMSE se aproxima de 0. Já o NRMSE é uma medida relativa, com

melhor eficiência à RMSE, pois permite a comparação de diferentes variáveis, classificando-se o modelo como muito bom ($\leq 10\%$), bom ($10\% - 15\%$), aceitável ($15\% - 20\%$), ruim ($20\% - 25\%$) e péssimo ($> 25\%$) (Kanda et al., 2021; Yang et al., 2014). O R^2 descreve a proporção da variância total dos dados observados que pode ser explicada pelo modelo. Os valores de R^2 variam de 0 a 1, sendo que, quanto mais próximo de 1 melhor é o ajuste. O d tem resultados com variação entre 0 e 1, evidenciando-se que valores mais próximos de 1 mostram melhores concordâncias entre os dados simulados e observados, com isso, limitou-se o parâmetro $d \geq 0,75$ como valor mínimo permissível para modelos de crescimento e rendimento de culturas (Yang et al., 2014). O c classifica o desempenho do modelo obtido pelo produto entre o r e o d , com variação entre 0 e 1, e valores mais próximos de 1 como os de melhores desempenhos.

Resultados

Consórcio palma forrageira-sorgo sob condições de irrigação complementar

Na Figura 4 observa-se as interações e respostas dos clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM) dentro dos distintos sistemas produtivos de forma exclusiva e em consórcio com variedades de sorgo (SF11, P288 e 467). Foi constatada, de forma geral, maior cobertura do dossel (CC) e produção de biomassa da palma forrageira em sistema exclusivo em relação ao consórcio com as cultivares de sorgo.

Para este experimento, foram calibrados os parâmetros do modelo *AquaCrop* para duas situações, evidenciando os parâmetros dos clones da palma forrageira em sistemas exclusivos e consorciados com as cultivares de sorgo, além do ajuste dos parâmetros das cultivares de sorgo para ambos os sistemas (Tabela 3).

O sistema exclusivo com o clone OEM destacou-se em relação aos demais clones forrageiros por apresentar um elevado crescimento da cobertura do dossel até 80 dias após o corte de uniformização, taxa de crescimento de $0,59\% \text{ dia}^{-1}$ até aproximadamente 46,54% de CC. Após este período há um contínuo crescimento, porém de forma mais estável até o final do ciclo, com taxa de crescimento aproximadamente $0,08\% \text{ dia}^{-1}$. Os demais sistemas tiveram o desenvolvimento da CC de forma mais regular ao longo do ciclo, $0,20\% \text{ dia}^{-1}$ e $0,16\% \text{ dia}^{-1}$ para os clones MIU e IPA, respectivamente (Figura 4).

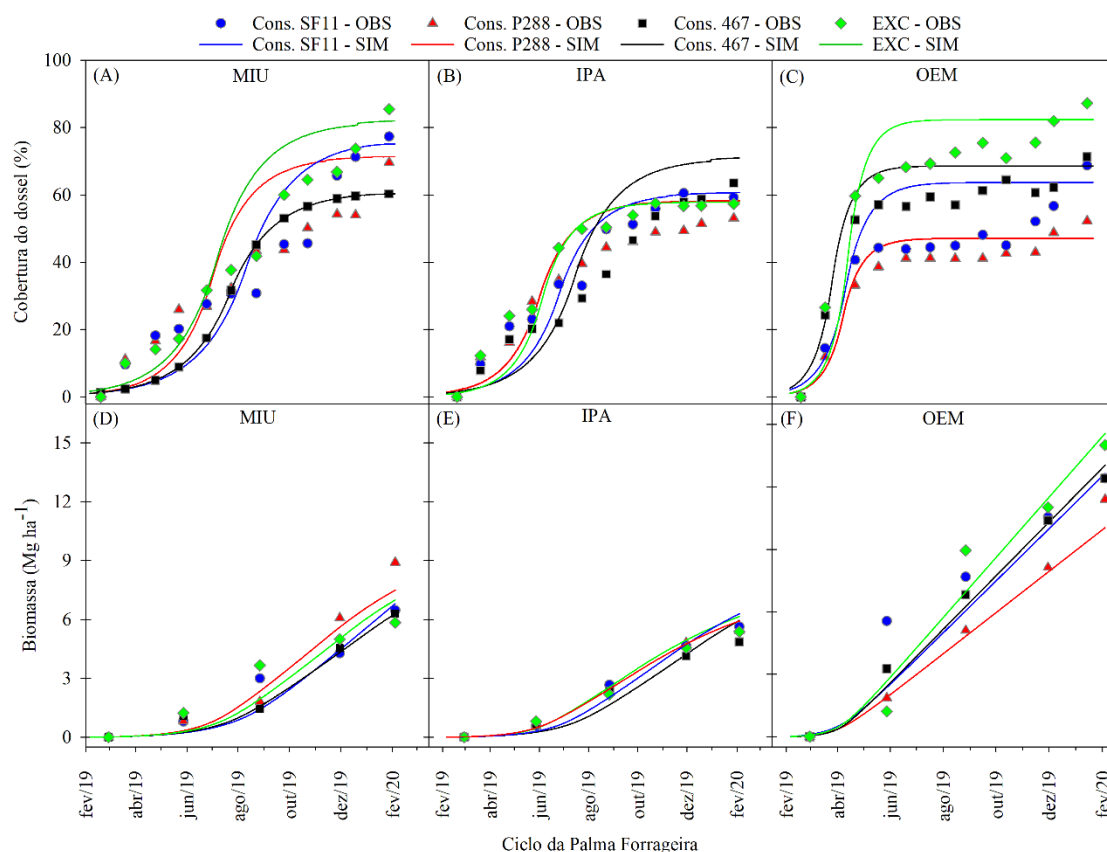


Figura 4. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel para a MIU (A), IPA (B) e OEM (C) e biomassa MIU (D), IPA (E) e OEM (C) em sistema de consórcio com as variedades de sorgo e exclusiva sob irrigação complementar no semiárido brasileiro.

De forma geral, a produção de biomassa da OEM dentro dos sistemas produtivos consorciado e exclusivos foram responsáveis por apresentar as maiores produções em relação aos demais sistemas. Ao final ciclo, a OEM computou valor médio de 12,56 Mg ha⁻¹, biomassa seca média superior 82,56 e 135,65% ao constatado pela MIU e IPA, respectivamente.

Pode-se destacar que, de modo geral, há similaridade no comportamento dos diferentes clones nos distintos sistemas produtivos. No entanto, percebe-se que o máximo desenvolvimento do dossel ocorre de forma antecipada nos sistemas com OEM, em relação aos demais clones (Tabela 3). Em concordância com a maior produção de biomassa observada dos clones da OEM, os parâmetros de produtividade da água e máxima profundidade radicular desta também apresentaram valores mais elevados que os clones MIU e IPA. A produtividade da água da OEM foi, em média, 39 g m⁻², valor 19,08% e 39,29% superior aos evidenciados pela MIU e IPA, respectivamente.

Tabela 3. Parâmetros do *AquaCrop* utilizados para calibração dos clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com as cultivares de sorgo (P288, 467 e SF11)

Parâmetros	Ajustados											
	MIU- P288	OEM- 467	IPA- SF11	IPA- P288	MIU- SF11	IPA- 467	OEM- P288	OEM- SF11	MIU- 467	MIU- EXC	IPA- EXC	OEM- EXC
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5	5	5	5	5	5	6,7	10	6,7	5	5	6,7
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	0,75	2,5	0,75	0,75	0,75	0,75	1,67	3	1	0,75	0,75	2
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,6	5,1	2,5	2,8	2	2,2	4,5	3,8	4,9	2,4	3,1	4,8
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	71	68	60	43	78	61	46	63	61	76	57	82
Máximo desenvolvimento do dossel (DAP)	277	115	271	232	352	309	130	146	324	303	224	131
Profundidade da raiz (m)	0,65	1	0,6	0,6	0,65	0,6	1	1	1	0,65	0,65	1
Profundidade máxima da raiz (DAP)	212	248	219	186	256	307	133	192	270	321	246	191
Max. Evapotranspiração da cultura	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	31	38	28	29	30	28	39	40	39	31	27	39
Índice de colheita - HI (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Função de expansão do dossel												
p-superior	0,30	0,34	0,27	0,25	0,32	0,28	0,30	0,35	0,29	0,28	0,28	0,39
p-inferior	0,65	0,65	0,6	0,7	0,62	0,65	0,65	0,7	0,68	0,6	0,61	0,72
Forma da curva	1	2,1	1,8	2,4	3,3	1,8	3	1,2	3	2,2	3,8	3,9
Função de fechamento estomático												
p-superior	0,7	0,74	0,69	0,69	0,68	0,68	0,7	0,75	0,72	0,68	0,68	0,81
Forma da curva	3	4,9	2,7	2,7	4,1	3	6	4,6	4,2	4,8	4,7	4,9
Função de senescência no dossel precoce												
p-superior	0,75	0,83	0,73	0,73	0,71	0,74	0,75	0,8	0,71	0,75	0,72	0,83
Forma da curva	3	4,5	2,9	2,6	3,7	3	3	2,9	4,3	5	2,5	3,8
Temperatura base	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Temperatura sup.	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39

Após ajuste dos parâmetros foi realizada a validação com dados observados nos demais blocos, nas mesmas condições de cultivo (Tabela 4). Com isso, verificou-se que houve elevados resultados de ajustes com base no coeficiente de determinação (R^2) para a biomassa, com valores médios acima de 0,94. Os índices d e c também evidenciaram o desempenho “ótimo” do modelo para esses sistemas agrícolas. O desempenho do modelo na estimativa da CC, apesar de apontar bons desempenhos para os distintos sistemas, constatou elevados valores de NRMSE.

Tabela 4. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para os clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com as cultivares de sorgo (P288, 467 e SF11)

	Cobertura do dossel											
	MIU- P288	OEM- 467	MIU- EXC	IPA- SF11	IPA- P288	MIU- SF11	IPA- 467	OEM- P288	OEM- SF11	MIU- 467	IPA- EXC	OEM- EXC
RMSE	20,62	18,08	10,39	5,54	12,11	0,62	13,05	12,52	39,08	1,27	5,96	20,01
NRMSE	63,27	35,77	27,36	15,41	35,93	1,87	41,04	35,99	98,91	4,21	15,18	33,08
R	0,95	0,98	0,97	0,96	0,97	0,93	0,97	0,99	0,97	0,95	0,98	0,98
R^2	0,91	0,95	0,95	0,92	0,95	0,87	0,94	0,98	0,94	0,91	0,95	0,95
d	0,93	0,96	0,97	0,98	0,97	0,96	0,96	0,99	0,86	0,98	0,98	0,97
c	0,88	0,94	0,94	0,94	0,94	0,90	0,93	0,97	0,84	0,93	0,96	0,95
	Biomassa											
	MIU- P288	OEM- 467	MIU- EXC	IPA- SF11	IPA- P288	MIU- SF11	IPA- 467	OEM- P288	OEM- SF11	MIU- 467	IPA- EXC	OEM- EXC
RMSE	0,81	0,39	0,67	0,08	0,24	0,73	0,02	0,79	2,27	0,41	0,53	0,23
NRMSE	23,11	5,98	21,15	2,90	9,03	24,98	1,02	14,89	31,39	15,37	0,24	3,34
R	0,99	1,00	0,94	0,99	1,00	0,97	0,98	1,00	0,96	0,99	1,00	0,98
R^2	0,98	0,99	0,89	0,98	0,99	0,94	0,96	1,00	0,93	0,98	0,99	0,96
d	0,99	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99
c	0,98	0,99	0,93	0,99	1,00	0,96	0,97	0,99	0,93	0,99	0,99	0,97

Observando-se o desenvolvimento do sorgo dentro dos sistemas analisados (Figura 5), constata-se uma similaridade no desenvolvimento da CC durante o ciclo para as diferentes variáveis (P288, 467 e SF11). Todavia, destaca-se a maior cobertura do dossel para a cultivar P288 (93,7%), seguido da 467 (87,4%) e SF11 (83,6%). Em resposta ao processo de desenvolvimento da CC, a cultivar P288 apresentou a maior produção de biomassa nos sistemas consorciados com palma, com valor médio equivalente a 19,8 Mg ha⁻¹, valor 25,7% e 28,3% superior as cultivares SF11 e 467, respectivamente. Todos os sistemas de plantio apresentaram as maiores produções de biomassa para as cultivares de sorgo em condições de plantio exclusivo.

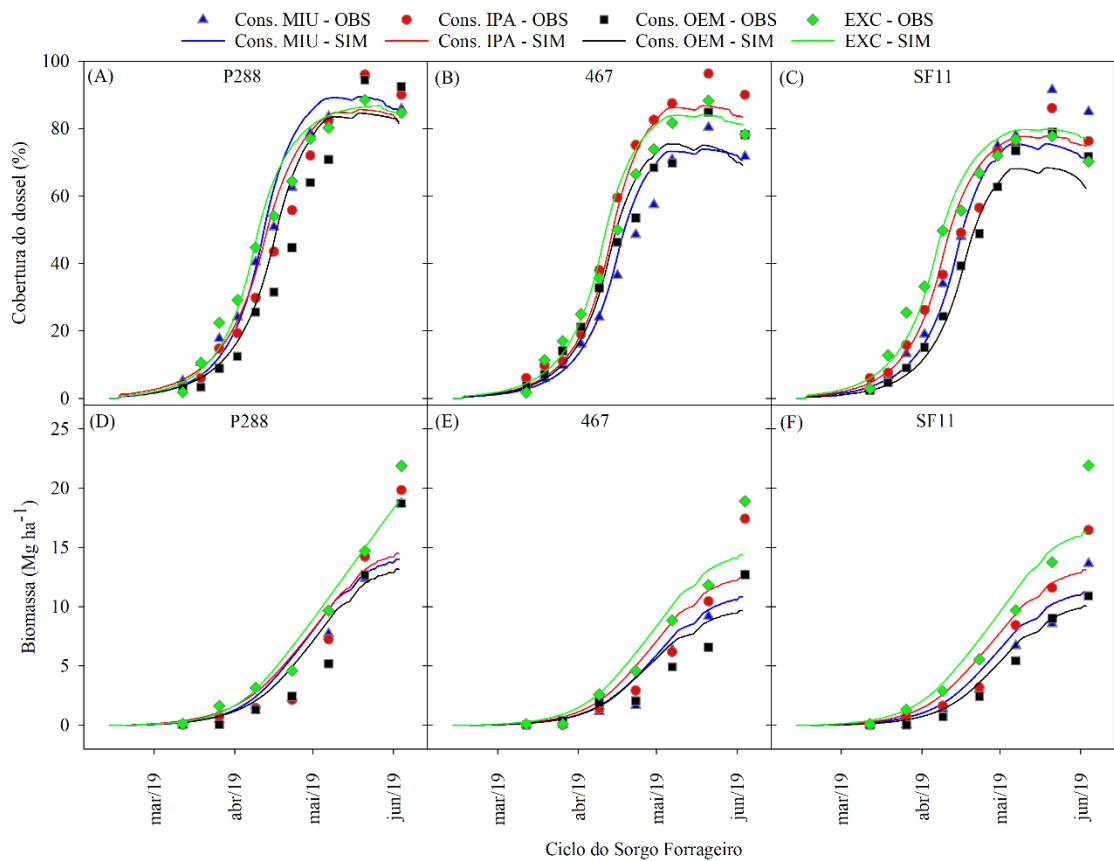


Figura 5. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel e biomassa para P288 (A), 467 (B) e SF11 (C) e biomassa do P288 (D), 467 (E) e SF11 (C) em consórcio com os clones de palma e exclusiva sob irrigação no semiárido brasileiro.

Dentre os principais parâmetros ajustados na simulação das cultivares de sorgo, destaca-se a maior produtividade da água para as condições de cultivo do sorgo de forma exclusiva (Tabela 5).

Tabela 5. Principais parâmetros do *AquaCrop* utilizados para calibração das cultivares de sorgo forrageiro (P288, 467 e SF11) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com os clones de palma (MIU, IPA e OEM)

Parâmetros	Ajustados											
	P288-MIU	467-OEM	SF11-IPA	P288-IPA	SF11-MIU	467-IPA	P288-OEM	SF11-OEM	467-MIU	P288-EXC	467-EXC	SF11-EXC
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	16,7	14,3	20	20	16,7	16,7	20	10	12,5	20	20	20
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	0,5	0,43	0,6	1	0,5	0,5	0,6	0,3	0,37	0,6	0,6	0,8
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	8,2	8	7,9	6,8	7,8	7,9	7,2	7,8	7,8	8,1	8	7,8
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	96	79	77	93	82	95	95	72	79	85	88	79
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	5,2	7,8	3,8	4,1	5,3	3,8	3,1	9,3	4,3	4,2	3,1	68
Emergência (DAP)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Máximo desenvolvimento do dossel (DAP)	99	101	97	108	102	102	109	106	105	96	98	95
Início da senescência (DAP)	106	106	105	110	109	107	111	110	110	105	104	109
Início da floração (DAP)	87	86	90	101	94	92	93	91	93	94	87	95
Profundidade da raiz (m)	0,6	0,45	0,55	0,65	0,5	0,55	0,6	0,5	0,5	0,65	0,6	0,65
Profundidade máxima da raiz (DAP)	87	99	89	101	110	85	106	99	88	87	80	93
Max. Evapotranspiração da cultura	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	32	25	31	32	30	30	33	30	30	34	33	35
Índice de colheita - HI (%)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Função de expansão do dossel												
p-superior	0,25	0,25	0,23	0,29	0,22	0,25	0,28	0,23	0,22	0,28	0,23	0,23
p-inferior	0,6	0,6	0,71	0,67	0,56	0,6	0,69	0,53	0,53	0,61	0,58	0,56
Forma da curva	3	3	3	2,3	1,3	3	1,7	3	4,9	3	2,5	2,5
Função de fechamento estomático												
p-superior	0,65	0,65	0,65	0,68	0,59	0,65	0,69	0,6	0,65	0,66	0,62	0,65
Forma da curva	6	6	6	3,9	3,3	6	2,1	6	6	5,2	5,7	5,4
Função de senescência no dossel precoce												
p-superior	0,65	0,65	0,65	0,73	0,62	0,65	0,72	0,65	0,65	0,62	0,62	0,65
Forma da curva	5	5	5	3,8	3	5	3	5	5	4,2	4	4,6
Temperatura base	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Temperatura sup.	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38

A validação das simulações do crescimento e desenvolvimento das cultivares de sorgo dentro dos distintos sistemas apresentou resultados com confiabilidade aceitável, com valor médio de NRMSE = 15,6% e $R^2 = 0,97$ para CC. Paralelamente, a produção de biomassa constatou valores estatísticos médios de NRMSE = 10,9% e $R^2 = 0,92$ (Tabela 6), evidenciando-se como bom desempenho.

Tabela 6. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da Cobertura do Dossel e Biomassa para as cultivares de sorgo forrageiro (P288, 467 e SF11) dentro dos sistemas exclusivos e consorciados com clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM)

	Cobertura do dossel											
	P228- -MIU	467- OEM	SF11- IPA	P228- IPA	SF11- MIU	467- IPA	P288- OEM	SF11- OEM	467- MIU	P228- EXC	467- EXC	SF11- EXC
RMSE	1,16	4,51	1,79	6,89	18,93	14,22	12,01	12,38	2,69	1,93	4,47	3,55
NRMSE	2,29	10,34	3,88	14,76	40,01	27,22	29,28	31,63	7,00	3,81	9,29	7,20
R	0,99	0,98	0,98	0,98	0,99	1,00	0,96	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
R^2	0,97	0,96	0,97	0,96	0,98	0,99	0,93	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98
<i>d</i>	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
<i>c</i>	0,98	0,97	0,98	0,97	0,98	0,99	0,94	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
	Biomassa											
	P228- -MIU	467- OEM	SF11- IPA	P228- IPA	SF11- MIU	467- IPA	P288- OEM	SF11- OEM	467- MIU	P228- EXC	467- EXC	SF11- EXC
RMSE	0,70	0,91	0,38	0,30	0,92	0,44	0,22	0,78	0,93	0,54	0,15	0,53
NRMSE	11,45	22,13	6,34	4,55	19,25	8,04	3,85	19,16	20,98	6,72	2,27	6,65
R	0,95	0,92	0,97	0,95	0,97	0,94	0,94	0,99	0,98	0,99	0,96	0,96
R^2	0,91	0,84	0,94	0,91	0,94	0,89	0,88	0,98	0,95	0,97	0,93	0,92
<i>d</i>	0,97	0,95	0,98	0,96	0,98	0,96	0,95	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98
<i>c</i>	0,92	0,87	0,95	0,91	0,95	0,90	0,89	0,98	0,96	0,98	0,94	0,94

Clones de palma forrageira sob distintos regimes hídricos

Os sistemas de plantios com clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes regimes hídricos com base na ET_c (0%, 40%, 80% e 120%) apresentaram resultados que evidenciam a influência direta do manejo hídrico nas respostas do cultivo.

De forma geral, constata-se que, com a aplicação da lâmina máxima de irrigação (120%), ocorre um efeito redutor de forma acentuada na CC para todos os clones (Figura 6). Analisando-se de forma individual, verifica-se que, independentemente da lâmina, o clone OEM apresentou os maiores desenvolvimentos da CC em relação aos demais clones.

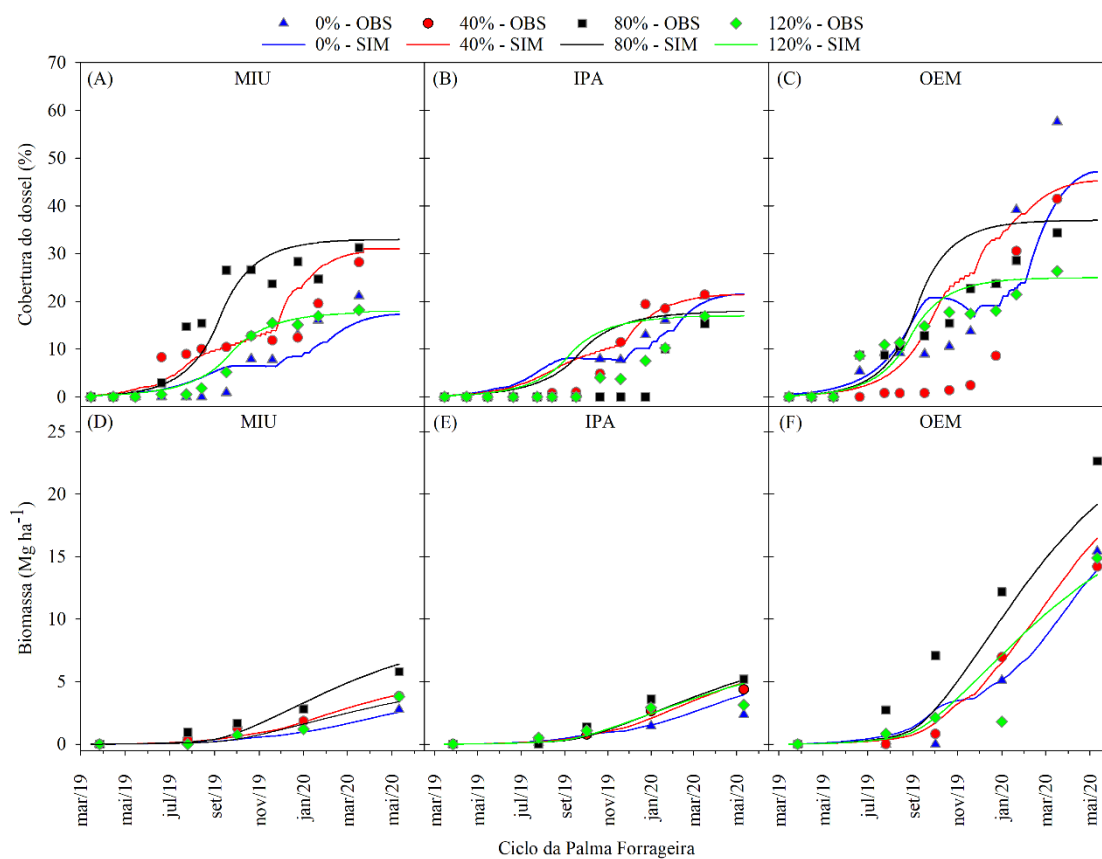


Figura 6. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel (A, B e C) e biomassa (D, E e F) dos clones de palma forrageira MIU, IPA e OEM com distintos regimes hídricos (0%, 40%, 80% 120%) com base na ET_c no semiárido brasileiro.

A produção de biomassa desses sistemas de plantio apresentou os maiores resultados para a lâmina de 80% para os três clones avaliados (Figura 6). O clone OEM foi responsável pela maior produção de biomassa, com média de $16,8 \text{ Mg ha}^{-1}$.

A Tabela 7 apresenta os principais parâmetros ajustados para simulação, com destaque para a elevada produtividade da água da OEM, com média aproximada de $37,5 \text{ g m}^{-2}$, seguido da IPA ($17,8 \text{ g m}^{-2}$) e MIU ($12,5 \text{ g m}^{-2}$).

Tabela 7. Principais parâmetros do *AquaCrop* utilizados para calibração dos clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes lâminas de irrigação (0, 40, 80 e 120% da ET_c)

Parâmetros	Ajustados											
	MIU 0%	MIU 40%	MIU 80%	MIU 120%	IPA 0%	IPA 40%	IPA 80%	IPA 120%	OEM 0%	OEM 40%	OEM 80%	OEM 120%
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25	0,25
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,0	3,3	2,4	2,0	2,8	2,4	1,9	2,1	2,0	2,1	2,5	2,3
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	20	31	33	18	23	22	18	17	58	48	37	25
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	343	221	313	339	254	252	354	327	357	365	307	305
Profundidade da raiz (m)	0,8	0,75	0,65	0,35	0,75	0,65	0,7	0,5	1	0,8	0,8	0,8
Profundidade máxima da raiz (DAC)	223	256	267	311	228	256	301	314	313	303	267	306
Max. Evapotranspiração da cultura	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	90	80	90	70	80	90	90	90	90	90	90	90
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	13	12	13	12	18	18	18	17	38	36	39	36
Índice de colheita - HI (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Função de expansão do dossel												
p-superior	0,25	0,20	0,35	0,23	0,31	0,26	0,28	0,26	0,39	0,49	0,35	0,35
p-inferior	0,60	0,51	0,70	0,55	0,65	0,60	0,60	0,65	0,74	0,79	0,70	0,70
Forma da curva	3	2,7	2	2	1,3	1,2	1,3	1,8	1,5	1,2	2	2
Função de fechamento estomático												
p-superior	0,65	0,57	0,75	0,67	0,68	0,57	0,72	0,6	0,8	0,8	0,75	0,75
Forma da curva	6	6	2,5	2,5	3,3	3,1	3,1	2,9	3,1	4,8	2,5	3
Função de senescência no dossel precoce												
p-superior	75	0,59	0,8	0,69	0,72	0,78	0,72	0,74	0,83	0,83	0,8	0,78
Forma da curva	4	5	3,8	3,4	4,8	5,5	2,6	1,1	4,8	4,8	3,8	3,5
Temperatura base	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Temperatura sup.	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39

Na Tabela 8 pode-se observar a validação da simulação apresentada que resultou em valores médios elevados de R^2 para a biomassa, com valores acima de 0,82. Dentre as lâminas de irrigações, a de 120% da ET_c constatou o menor R^2 , com valor médio de 0,87. De forma geral, apesar dos elevados valores de NRMSE, os modelos apresentaram bons e ótimos desempenhos para os diferentes sistemas produtivos com base nos índices *c* e *d*.

Tabela 8. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da Cobertura do Dossel e Biomassa para os clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes lâminas de irrigação (0, 40, 80 e 120% da ET_c)

Cobertura do dossel												
	MIU - 0%	MIU - 40%	MIU - 80%	MIU - 120%	IPA - 0%	IPA - 40%	IPA - 80%	IPA - 120%	OEM - 0%	OEM - 40%	OEM - 80%	OEM - 120%
RMSE	0,69	4,33	0,76	2,88	5,05	5,97	20,76	16,63	2,76	29,68	15,08	2,04
NRMSE	12,4	42,42	4,67	39,96	90,66	92,57	978,17	468,44	18,64	409,84	109,26	16,71
R	0,94	0,93	0,94	0,99	0,90	0,95	0,59	0,79	0,89	0,81	0,93	0,94
R ²	0,88	0,86	0,88	0,98	0,82	0,90	0,35	0,63	0,80	0,66	0,87	0,87
<i>d</i>	0,91	0,94	0,96	0,99	0,92	0,96	0,63	0,75	0,91	0,83	0,91	0,96
<i>c</i>	0,86	0,87	0,90	0,98	0,83	0,91	0,37	0,60	0,82	0,67	0,85	0,89
Biomassa												
	MIU - 0%	MIU - 40%	MIU - 80%	MIU - 120%	IPA - 0%	IPA - 40%	IPA - 80%	IPA - 120%	OEM - 0%	OEM - 40%	OEM - 80%	OEM - 120%
RMSE	0,70	0,35	0,19	0,10	0,76	0,16	0,81	0,21	0,88	1,37	5,40	1,61
NRMSE	62,62	23,85	8,61	8,55	79,52	9,61	39,63	13,84	21,38	31,23	60,53	41,04
R	0,97	0,98	0,99	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,92	0,98	0,99	0,90
R ²	0,95	0,97	0,97	0,96	0,93	0,97	0,94	0,84	0,97	0,99	0,97	0,82
<i>d</i>	0,96	0,99	0,98	0,99	0,91	0,99	0,98	0,92	0,98	0,99	0,97	0,95
<i>c</i>	0,94	0,97	0,98	0,88	0,97	0,97	0,97	0,95	0,85	0,96	0,95	0,86

Resposta de clones de palma forrageira submetida a frequências de irrigação

No sistema da palma forrageira sob frequências de irrigação não se evidencia diferença no desenvolvimento da CC entre os clones. No entanto, assim como observado nos experimentos anteriores, o clone OEM apresentou as maiores produções de biomassa que os demais clones (Figura 7).

O experimento teve início em setembro de 2019, período do ano em que a região do semiárido brasileiro historicamente é caracterizada pelo elevado déficit hídrico e altas temperaturas. Por conseguinte, no início de 2020, quando teve início o período chuvoso e posterior redução da temperatura, nota-se uma elevação acentuada da CC. Mesmo o sistema conduzido sob irrigação, nota-se a combinação de fatores climáticos proporcionando menores perdas das culturas por evapotranspiração.

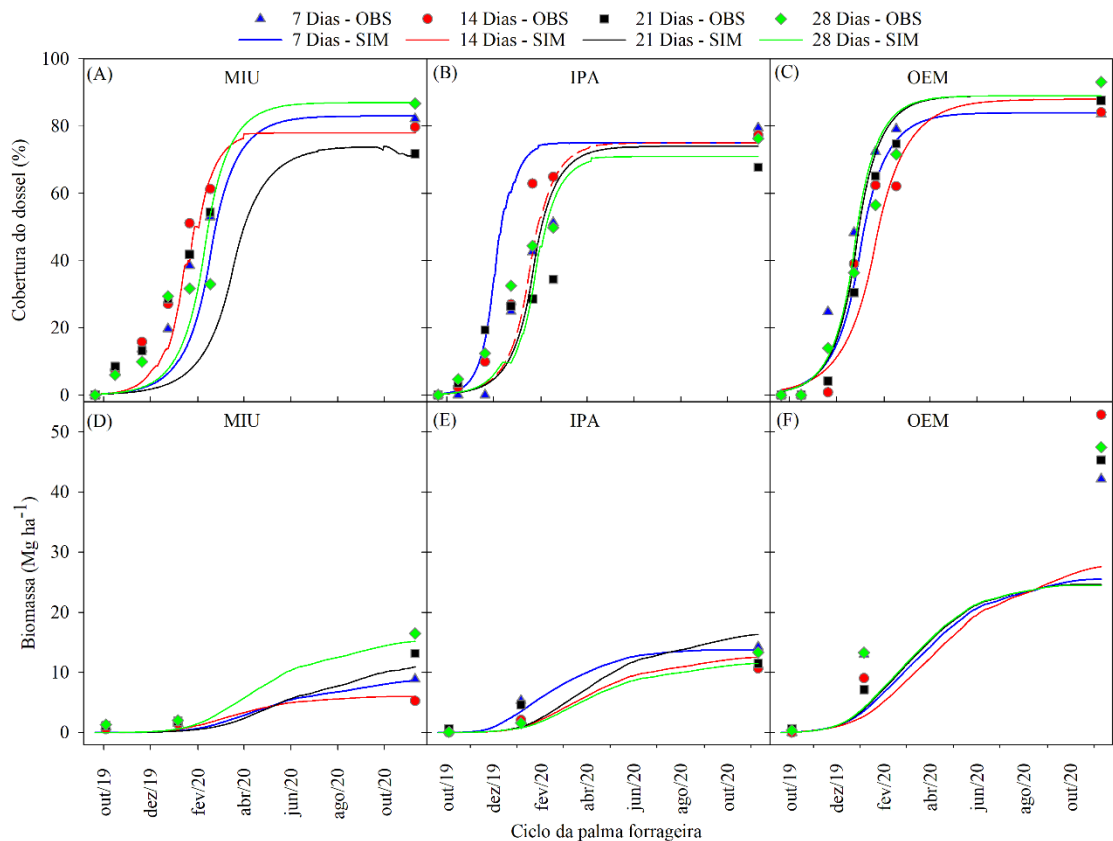


Figura 7. Simulação do desenvolvimento da cobertura do dossel (A, B e C) e biomassa (D, E e F) dos clones de palma forrageira MIU, IPA e OEM com diferentes frequências de irrigação (7, 14, 21 e 28 dias) no semiárido brasileiro.

Mediante as condições observadas em campo e as limitações de simulação do modelo *AquaCrop* para plantas com metabolismo CAM, o modelo apresentou limitações nas simulações para a OEM, clone de elevado potencial produtivo, com valores simulados abaixo dos observados ao final do ciclo (Figura 6).

Para que houvesse a maior aproximação possível entre os resultados simulados e os observados, foi necessário aumentar a profundidade máxima do sistema radicular do clone OEM (Tabela 9).

Tabela 9. Principais parâmetros do *AquaCrop* utilizados para calibração dos clones da palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob diferentes regimes hídricos (7, 14, 21 e 28 dias)

Parâmetros	Ajustados											
	MIU - 7	MIU - 14	MIU - 21	MIU - 28	IPA - 7	IPA - 14	IPA - 21	IPA - 28	OEM - 7	OEM - 14	OEM - 21	OEM - 28
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	1,5	1	1
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	3,4	5,0	6,5	3,6	6,7	4,3	4,0	4,5	3,3	2,7	3,8	3,9
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	83	78	76	87	75	75	74	71	84	88	89	89
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	244	165	126	232	122	192	205	180	203	240	183	179
Profundidade da raiz (m)	0,5	0,55	1	1,1	0,7	0,8	1	0,8	1,7	1,75	1,75	1,75
Profundidade máxima da raiz (DAC)	251	317	178	150	266	247	272	240	203	218	159	215
Max. Evapotranspiração da cultura	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	90	90	95	90	90	90	90	90	95	90	95	95
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	13	11	19	23	24	20	26	20	38	38	38	38
Índice de colheita - HI (%)	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Função de expansão do dossel												
p-superior	0,30	0,24	0,29	0,32	0,31	0,31	0,27	0,25	0,44	0,33	0,36	0,34
p-inferior	0,65	0,62	0,60	0,71	0,69	0,70	0,72	0,76	0,77	0,68	0,70	0,66
Forma da curva	1,2	2,5	3,5	4,5	3,2	3,8	4,5	3,4	5,5	4,7	3,7	4,3
Função de fechamento estomático												
p-superior	0,7	0,66	0,68	0,69	0,61	0,65	0,71	0,73	0,79	0,81	0,79	0,77
Forma da curva	4,6	1,8	2	4,3	5,2	4,7	5,3	4,3	5,5	3,3	3,8	4,2
Função de senescência no dossel precoce												
p-superior	0,75	0,7	0,73	0,72	0,72	0,7	0,64	0,61	0,84	0,73	0,79	0,75
Forma da curva	3,3	2,3	5,4	6	3,5	4,5	4,8	3,8	5,3	4,4	5	3,9
Temperatura base	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Temperatura sup.	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39

Os resultados estatísticos das simulações de biomassa apresentaram altos coeficientes de determinação, sendo o valor médio de R^2 de 0,99. No entanto, os resultados observados e simulados de biomassa apresentaram alta variação no seu comportamento, como observado pelo erro quadrático médio normalizado (NRMSE), oscilando entre 5,23% e 91,89% (Tabela 10).

Tabela 10. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para os clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM) sob regimes hídricos (7, 14, 21 e 28 dias)

Cobertura do dossel												
	MIU - 7	MIU - 14	MIU - 21	MIU - 28	IPA - 7	IPA - 14	IPA - 21	IPA - 28	OEM - 7	OEM - 14	OEM - 21	OEM - 28
RMSE	23,97	15,64	44,75	8,98	38,72	17,39	2,40	17,66	14,31	5,09	13,50	12,47
NRMSE	78,56	45,17	143,43	31,96	136,69	49,82	9,33	56,16	32,50	14,34	36,02	32,15
R	0,96	0,98	0,81	0,92	0,89	0,97	0,89	0,94	0,98	0,95	1,00	0,98
R^2	0,93	0,96	0,66	0,85	0,80	0,94	0,80	0,89	0,95	0,91	0,99	0,96
<i>d</i>	0,96	0,98	0,82	0,95	0,89	0,97	0,92	0,95	0,98	0,97	0,99	0,98
<i>c</i>	0,92	0,96	0,66	0,88	0,80	0,94	0,82	0,90	0,96	0,93	0,99	0,97
Biomassa												
	MIU - 7	OEM - 7	OEM - 14	IPA - 7	MIU - 28	MIU - 14	IPA - 14	IPA - 21	IPA - 28	MIU - 21	OEM - 21	OEM - 28
RMSE	1,32	15,00	18,18	1,51	2,34	0,45	0,35	0,29	1,57	2,89	14,18	18,73
NRMSE	35,13	81,58	88,12	22,75	35,43	18,46	8,29	5,23	31,39	53,51	79,97	91,89
R	1,00	0,98	1,00	0,99	1,00	1,00	0,99	0,95	1,00	1,00	1,00	0,99
R^2	1,00	0,97	0,99	0,99	1,00	0,99	0,98	0,90	1,00	1,00	1,00	0,99
<i>d</i>	0,99	0,86	0,83	0,99	0,99	0,97	0,98	0,91	0,99	0,97	0,85	0,81
<i>c</i>	0,99	0,85	0,83	0,98	0,99	0,97	0,98	0,86	0,99	0,97	0,85	0,80

Na estimativa de biomassa, os sistemas OEM-14 e OEM-28 foram responsáveis pelos maiores valores de NRMSE e, consecutivamente, os menores desempenhos com base no índice *c*.

Resposta agrônômica do consórcio entre palma forrageira-milheto em condições de solo com e sem cobertura morta

Analisando o comportamento dos sistemas produtivos entre o clone de palma OEM e o milho em condições exclusivas e consorciadas sob sistemas com e sem cobertura morta, constata-se que há um crescimento da cobertura do dossel inicial mais acentuado da OEM quando submetida a cobertura morta (Figura 8A). A partir dos resultados obtidos pela simulação da produção da OEM é possível verificar, que durante o período de maior déficit hídrico e com temperaturas mais elevadas, o modelo subestima a produtividade de biomassa observada.

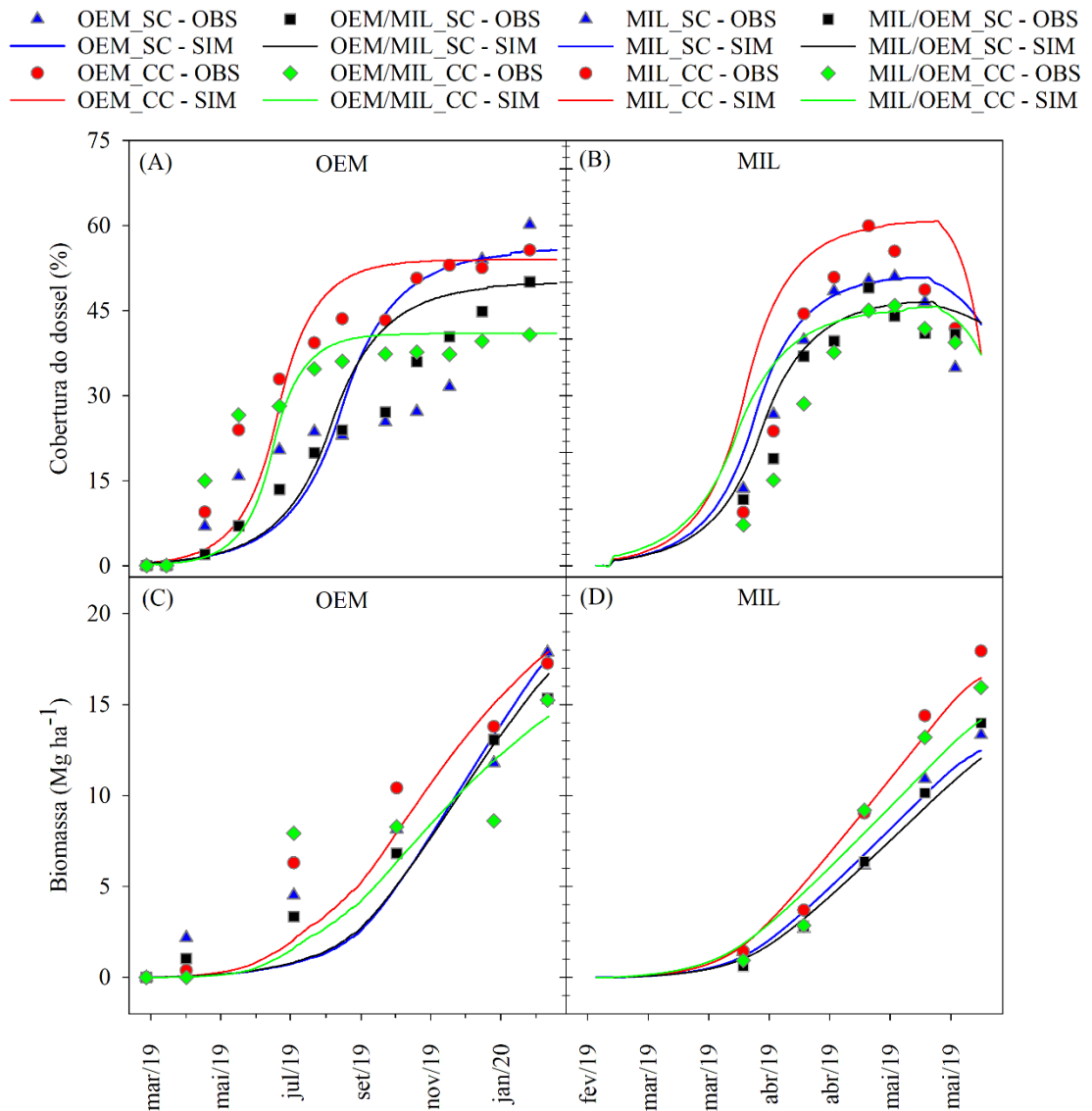


Figura 8. Simulação da influência da cobertura morta no desenvolvimento da cobertura do dossel (A e B) e biomassa (C e D) do clone de palma forrageira OEM e do milho, em condições exclusivas e consorciadas no semiárido brasileiro.

Dentre os principais parâmetros de ajustes do modelo, houve similaridade entre os tratamentos analisados, dentro de suas respectivas características metabólicas, ou seja, comparativo entre o clone OEM dentro das distintas situações e entre o Milheto nos diferentes sistemas produtivos (Tabela 11).

Tabela 11. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone de palma forrageira OEM cultivado de forma exclusiva e em consórcio com o milho sem e com uso cobertura morta

Parâmetros	Ajustados							
	OEM -SC	OEM/MI L - SC	OEM - CC	OEM/MI L - CC	OEM - SC	MIL/OE M - SC	MIL - CC	MIL/OE M - CC
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	3,1	3,1	3,1	3,1	16,7	16,7	20,0	16,7
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	0,47	0,47	0,47	0,16	0,83	0,83	0,4	0,5
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,4	2,5	3,6	4,5	10,2	9,5	11,3	10,5
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	56	50	54	41	52	48	61	46
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	-	-	-	-	9,9	6,5	18,8	12,6
Emergência (DAC)			-	-	4	4	4	4
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	300	287	204	181	69	73	71	71
Início da senescência (DAC)	-	-	-	-	78	79	77	77
Início da floração (DAC)	-	-	-	-	70	70	67	75
Profundidade da raiz (m)	0,6	0,6	0,6	0,55	0,65	0,7	0,85	0,8
Profundidade máxima da raiz (DAC)	199	261	184	221	64	68	57	60
Max. Evapotranspiração da cultura	0,52	0,52	0,52	0,52	1,2	1,2	1,2	1,2
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	90	90	90	90	90	90	90	90
Fator de forma								
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	33	33	33	32	33	34	38	38
Índice de colheita - HI (%)	50	50	50	50	80	80	80	80
Função de expansão do dossel								
p-superior	0,28	0,28	0,31	0,28	0,28	0,28	0,28	0,26
p-inferior	0,65	0,59	0,63	0,63	0,68	0,62	0,62	0,56
Forma da curva	2,5	4,4	3,3	1,5	2,3	2,2	3,1	2,0
Função de fechamento estomático								
p-superior	0,71	0,65	0,71	0,72	0,68	0,69	0,68	0,66
Forma da curva	5,9	2,1	4,7	1,5	4,1	2,5	2,4	3,1
Função de senescência no dossel precoce								
p-superior	0,82	0,69	0,74	0,72	0,73	0,72	0,71	0,7
Forma da curva	2,8	2,3	3,3	3,6	2,3	2,6	3,2	3,7
Temperatura base	18	18	18	18	10	10	10	10
Temperatura sup.	39	39	39	39	38	38	38	38

Os resultados estatísticos provenientes da validação da CC e biomassa apresentaram elevados valores, com R² médio igual 0,88 e 0,98, respectivamente. Juntamente a esses dados, verifica-se maior precisão na simulação da produção de biomassa do que na simulação da CC, como expressado pelos valores de NRMSE médios respectivos de 6,77% e 36,86%. A alta precisão na estimativa da produtividade é corroborada pelos ótimos desempenhos dos índices *c* e *d* para todos esses sistemas (Tabela 12).

Tabela 12. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone de palma forrageira OEM cultivado de forma exclusiva e em consórcio com o milho sem e com uso de cobertura morta

Cobertura do dossel								
	OEM - SC	OEM/MIL-SC	OEM - CC	OEM/MIL - CC	MIL - SC	MIL/OEM - SC	MIL - CC	MIL/OEM - CC
RMSE	7,45	8,96	0,05	5,63	12,25	9,45	31,88	22,28
NRMSE	30,99	40,57	0,15	20,28	31,46	26,79	76,25	68,34
R	0,85	0,97	0,96	0,92	0,93	0,96	0,94	0,96
R ²	0,72	0,94	0,93	0,84	0,87	0,91	0,88	0,91
<i>d</i>	0,90	0,97	0,98	0,94	0,92	0,95	0,78	0,75
<i>c</i>	0,77	0,94	0,94	0,86	0,86	0,91	0,73	0,71

Biomassa								
	OEM - SC	OEM/MIL - CC	OEM/MIL - SC	OEM - CC	MIL - SC	MIL/OEM - CC	MIL/OEM - SC	MIL - CC
RMSE	0,37	0,98	0,01	0,36	0,17	0,99	0,93	0,18
NRMSE	4,94	14,73	0,20	4,46	2,52	11,74	13,67	1,90
R	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00
R ²	0,98	0,94	0,99	0,99	0,98	0,98	1,00	1,00
<i>d</i>	0,99	0,98	1,00	1,00	0,99	0,98	0,99	1,00
<i>c</i>	0,98	0,95	0,99	0,99	0,98	0,97	0,99	1,00

Adaptabilidade e reposta produtiva de diferentes clones de palma forrageira sob irrigação complementar

Na Figura 9 são apresentados seis clones de palma forrageira com potencial para produção de forragem. Pode-se verificar que o clone F8 apresentou reduzido desenvolvimento da CC e, conseqüentemente, baixa produção de biomassa (Figura 8). Fato decorrente, principalmente, da alta mortalidade de plantas deste clone ocorrida ao longo do ciclo. Os clones OEM (26,5 Mg ha⁻¹) e a OEA (18,0 Mg ha⁻¹) destacaram-se como as maiores produções de biomassa em relação aos demais clones observados nesta pesquisa.

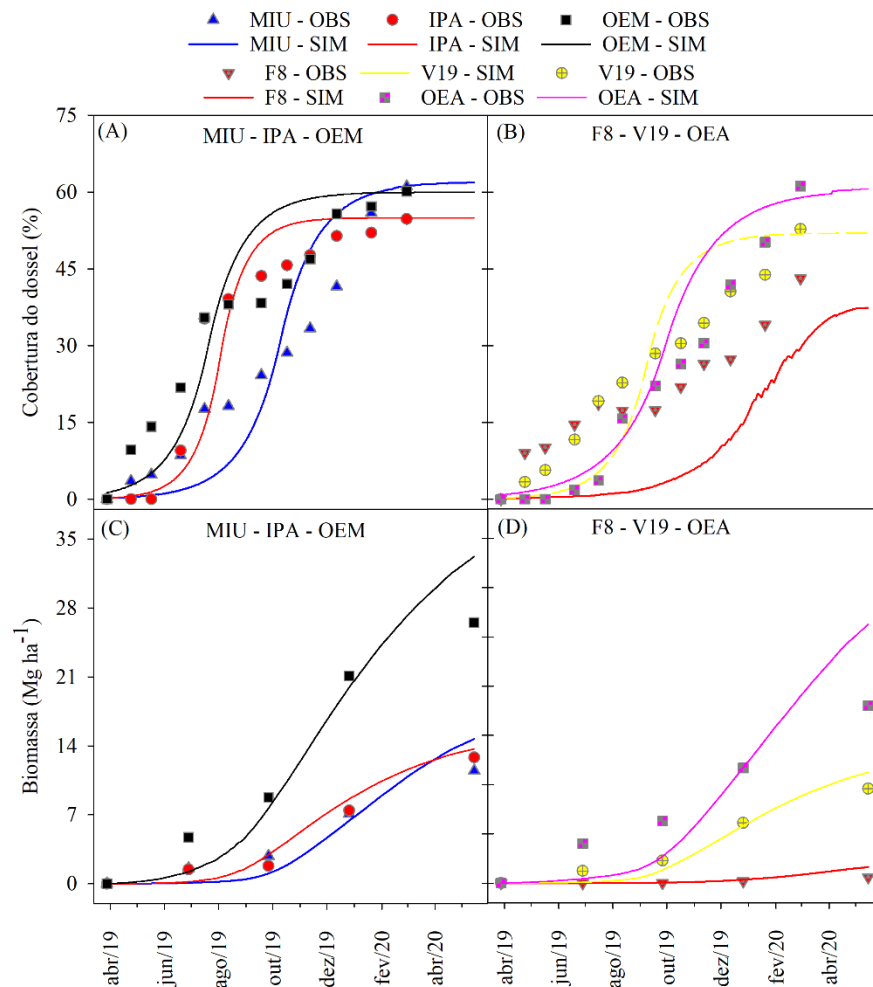


Figura 9. Simulação do desenvolvimento cobertura do dossel (A e B) e produção de biomassa (C e D) dos clones de palma forrageira MIU, IPA, OEM, F8, V19 e Orelha de Elefante Africana (OEA), conduzidas sob irrigação complementar e sistema de plantio exclusivo no semiárido brasileiro.

No processo de simulação do desenvolvimento da palma, para os clones OEM e OEA foi necessário aumentar a profundidade do sistema radicular o que contribuiu para um melhor ajuste entre os dados simulados e observados (Tabela 13). Esses dois clones, fisiologicamente mais rústicos e adaptados ao clima, apresentaram as maiores produtividades da água, com 39 e 33 g m⁻², respectivamente.

Tabela 13. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para os clones de palma forrageira MIU, IPA, OEM, OEA, V19 e F8 com irrigação e cultivados de forma exclusiva

Parâmetros	Ajustados					
	MIU	IPA	OEM	OEA	V19	F8
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5,0	5,0	4,2	4,2	4,2	2,8
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	0,21	0,21	1,25	0,83	0,21	0,1
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,5	3,8	2,8	1,9	2,9	2,5
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	62	55	60	61	52	43
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	323	213	232	355	275	350
Profundidade da raiz (m)	0,85	0,7	0,9	0,9	0,8	0,3
Profundidade máxima da raiz (DAC)	310	226	233	349	261	380
Max. Evapotranspiração da cultura	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Fator de forma						
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	21	21	39	33	15	5
Índice de colheita - HI (%)	50	50	50	50	50	50
Função de expansão do dossel						
p-superior	0,28	0,28	0,45	0,40	0,26	0,08
p-inferior	0,62	0,58	0,80	0,77	0,68	0,41
Forma da curva	2,1	2,3	3,8	5	3,3	2,1
Função de fechamento estomático						
p-superior	0,61	0,68	0,86	0,9	0,64	0,32
Forma da curva	1,8	2,4	2,2	3,2	1,5	1
Função de senescência no dossel precoce						
p-superior	0,69	0,71	0,75	0,87	0,65	0,33
Forma da curva	2,1	2,6	4,8	5,8	4	2,5
Temperatura base	18	18	18	18	18	18
Temperatura sup.	39	39	39	39	39	39

Estatisticamente, a simulação do clone F8 apresentou resultados péssimos, com oscilação representada pelo NRMSE de aproximadamente 230% na CC 336% na produção de biomassa. No entanto, a simulação dos demais clones computaram NRMSE médio de 20,9% para CC e 8,6% para a produção de biomassa, este classificado como ótimo desempenho (Tabela 14).

Tabela 14. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da Cobertura do Dossel e Biomassa para os clones de palma forrageira MIU, IPA, OEM, OEA, V19 e F8 sob condição de cultivo exclusivo e irrigado

Cobertura do dossel						
	MIU	IPA	OEM	OEA	V19	F8
RMSE	1,27	0,36	6,42	15,31	1,75	46,09
NRMSE	5,11	1,13	18,37	72,49	7,18	230,49
R	0,95	0,95	0,94	0,97	0,94	0,90
R ²	0,90	0,91	0,89	0,94	0,88	0,80
<i>d</i>	0,96	0,97	0,95	0,97	0,94	0,68
<i>c</i>	0,91	0,93	0,90	0,94	0,88	0,61
Biomassa						
	MIU	IPA	OEM	OEA	V19	F8
RMSE	0,30	0,85	0,39	0,50	0,34	0,55
NRMSE	6,54	18,01	3,20	6,25	8,79	335,77
R	0,98	0,99	0,96	0,99	0,99	0,98
R ²	0,96	0,98	0,96	0,92	0,98	0,99
<i>d</i>	0,97	0,99	0,98	0,93	0,98	0,73
<i>c</i>	0,94	0,97	0,89	0,98	0,72	0,96

Efeitos produtivos da consorciação da palma com diferentes culturas forrageiras sob irrigação complementar

Os sistemas produtivos compostos pelo clone de palma OEM cultivado de forma exclusiva e consorciado com duas cultivares de sorgo (SF15 e 1011) e milho de forma adensada evidenciaram que, mediante a alta densidade de plantio, os consórcios representados pelo sorgo e milho tiveram seu desenvolvimento e produção de biomassa comprometidos (Figura 10). As cultivares de sorgo apresentaram valor médio de CC de 73% e biomassa de 10 Mg ha⁻¹, já o milho praticamente não se desenvolveu. A palma forrageira teve comportamento divergente, mesmo em condições adensadas. Ao final do ciclo apresentou produção de biomassa média de aproximadamente 36 Mg ha⁻¹, sendo seu cultivo de forma exclusiva o de maior produção (39 Mg ha⁻¹).

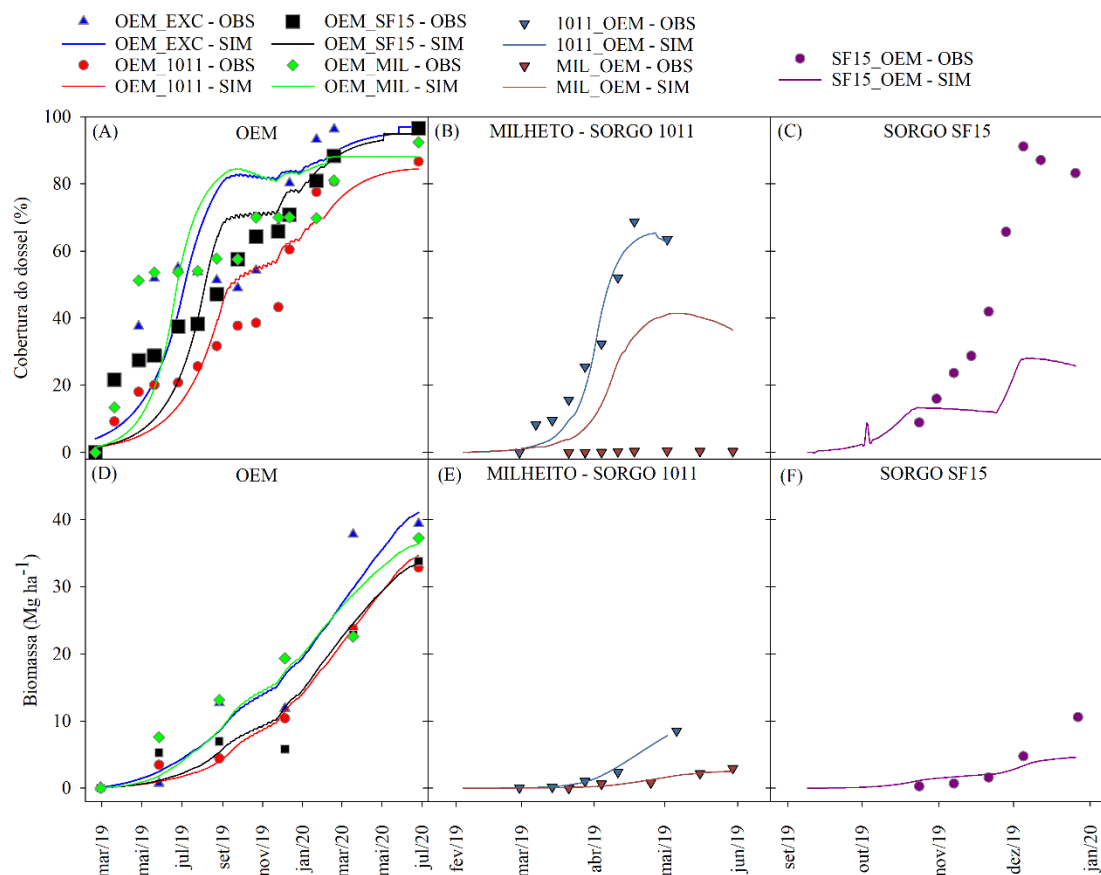


Figura 10. Simulação do desenvolvimento de cobertura do dossel (A, B e C) e produção de biomassa (D, E e F) do clone de palma forrageira OEM cultivado de forma exclusiva e consorciado com variedades de sorgo (SF15 e 1011) e milho sob irrigação complementar no semiárido brasileiro.

A partir da exposição dos comportamentos paramétricos dos sistemas de cultivos, destacando-se a baixa produtividade da água no milho em consórcio com a OEM (9,0 g m⁻²), bem inferior ao valor médio apresentando pelas cultivares de sorgo quando em consórcio com a OEM (33,0 g m⁻²). Já a palma forrageira OEM, independente do sistema de cultivo, constatou elevados valores de WP, com média equivalente a 49,0 g m⁻² (Tabela 15).

Tabela 15. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone de palma forrageira OEM em diferentes sistemas produtivos

Parâmetros	Ajustados						
	OEM-EXC	OEM-1011	OEM-MIL	OEM-SF15	1011-OEM	SF15-OEM	MILHETO-OEM
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	20	10	10	10	20	20	20
Cobertura inicial do dossel com emergência de 90%	4,00	1,50	1,50	1,50	0,10	0,40	0,20
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	1,8	1,8	2,8	2,1	11,9	9,5	9,7
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	97	88	88	95	70	91	45
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	3,7	3,7	4,3	90,3	6,8	5,7
Emergência (DAC)		-	-	-	4	4	4
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	310	376	235	320	80	88	86
Início da senescência (DAC)	-	-	-	-	84	97	100
Início da floração (DAC)	-	-	-	-	69	90	83
Profundidade da raiz (m)	1	0,9	0,95	0,8	0,45	0,7	0,5
Profundidade máxima da raiz (DAC)	300	339	243	337	70	80	71
Max. Evapotranspiração da cultura	0,52	0,52	0,52	0,52	1,10	1,10	1,20
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	90	90	90	90	90	90	90
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)	38	40	40	38	31	35	9
Índice de colheita - HI (%)	50	50	50	50	45	45	45
Função de expansão do dossel							
p-superior	0,31	0,33	0,49	0,47	0,22	0,32	0,10
p-inferior	0,66	0,68	0,80	0,77	0,64	0,67	0,45
Forma da curva	4,4	4,9	5,0	4,7	2,6	3,7	2,2
Função de fechamento estomático							
p-superior	0,67	0,78	0,74	0,74	0,60	0,72	0,45
Forma da curva	4,2	4,4	3,9	2,5	1,7	3,7	1,2
Função de senescência no dossel precoce							
p-superior	0,72	0,77	0,77	0,76	0,61	0,73	0,45
Forma da curva	3,9	5,6	5,7	4,7	3,8	4,7	3,3
Temperatura base	18	18	18	18	16	16	10
Temperatura superior	39	39	39	39	38	38	38

Na Tabela 16, observa-se o ajuste dos principais parâmetros e resultados estatísticos, que constituíram maiores similaridades entre os dados simulados de biomassa e observados em campo para a palma forrageira com e sem consórcio, com R² médio = 0,94 e NRMSE = 7,90%. Já as culturas de sorgo e milho utilizadas como consórcio computaram R² = 0,91, no entanto, com maiores variabilidades, como constatado pelo valor médio do NRMSE (29,45%).

Tabela 16. Parâmetros estatísticos resultantes da validação da cobertura do dossel e biomassa para o clone OEM dentro diferentes sistemas de produção

Cobertura do dossel							
	OEM – EXC	OEM - SF15	OEM - 1011	OEM - MIL	SORGO 1011 - OEM	SORGO SF15 - OEM	MILHETO - OEM
RMSE	8,63	1,17	9,32	5,49	5,92	94,51	7,87
NRMSE	16,88	3,67	18,02	12,19	19,30	190,62	34,48
R	0,79	0,95	0,81	0,94	0,98	-0,03	0,96
R ²	0,62	0,91	0,66	0,89	0,96	0,00	0,93
D	0,86	0,97	0,84	0,95	0,99	0,18	0,98
C	0,68	0,93	0,68	0,89	0,97	-0,01	0,95
Biomassa							
	OEM - EXC	OEM - SF15	OEM – 1011	OEM - MIL	SORGO 1011 - OEM	SORGO SF11 - OEM	MILHETO - OEM
RMSE	1,57	0,70	0,00	2,79	0,45	2,28	0,08
NRMSE	9,21	5,61	0,02	16,75	18,65	63,96	5,74
R	0,96	0,97	1,00	0,96	0,98	0,97	0,90
R ²	0,93	0,93	0,99	0,92	0,96	0,94	0,82
D	0,98	0,98	1,00	0,97	0,98	0,73	0,95
C	0,94	0,95	0,99	0,94	0,96	0,71	0,86

Efeitos produtivos da consorciação entre plantas forrageiras em condições exclusivas sob irrigação complementar.

Na Figura 11 observa-se a implicação ocasionada pelo cultivo de culturas forrageiras consorciadas em relação ao cultivo exclusivo. Quando o cultivo foi de forma exclusiva, houve maiores valores individuais de produtividade. Apesar dos valores individuais de biomassa das culturas em consórcio reduzirem em torno de 25%, o somatório proporcionado pela consorciação entre as duas culturas aumentou consideravelmente o valor total, computando biomassas superiores em relação ao plantio exclusivo em aproximadamente 63% (Figura 11A).

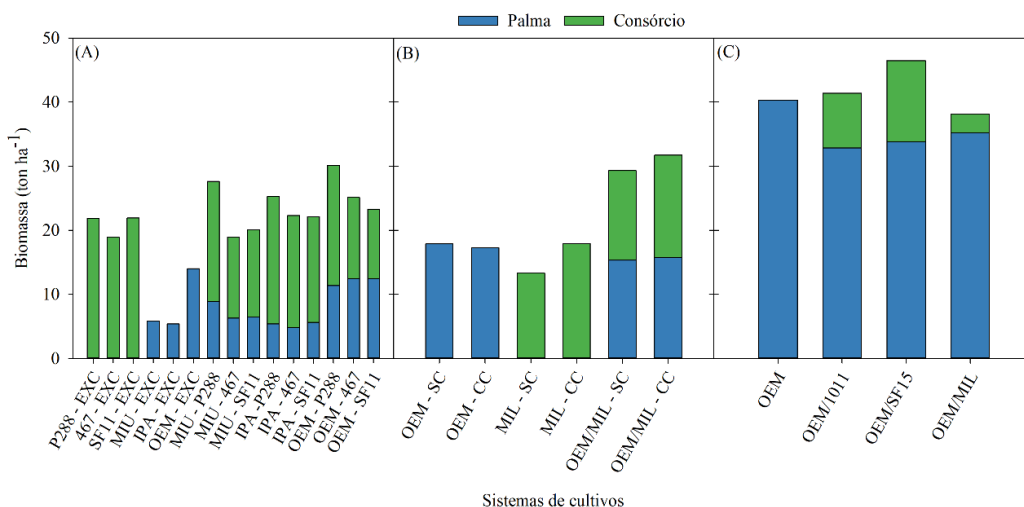


Figura 11. Efeito na produtividade ocasionado plantio consorciado entre a palma com outras culturas forrageiras.

O consórcio entre o clone de palma OEM com o Milheto proporcionou um aumento de aproximadamente 64% da produção de biomassa em relação ao cultivo da palma de forma exclusiva. Todavia, quando realizada a aplicação de cobertura morta no sistema consorciado, a produção de biomassa aumentou 78% em relação ao cultivo da palma de forma exclusiva (Figura 11-B).

Discussão

Eficiência do modelo AquaCrop na calibração e validação para diferentes sistemas de cultivos de plantas forrageiras de forma exclusiva e consorciada em ambiente semiárido

De forma geral, o modelo *AquaCrop* simulou os diferentes sistemas de cultivos de forma eficiente. Mesmo não havendo registros na literatura de simulações do modelo para a maioria das culturas forrageiras, com metabolismo MAC e sistemas com cultivos consorciados (Vanuytrecht et al., 2014b), foi possível verificar sua eficácia na simulação das culturas de forma exclusiva e dentro das suas respectivas condições de consórcio por meio dos índices estatísticos.

Apesar da constante otimização do modelo *AquaCrop* e da contínua parametrização de novas culturas agrícolas, ainda não há parâmetros estabelecidos e publicados para a palma forrageira, evidenciando essa necessidade mediante sua importância agrícola e de mitigação da demanda de forragem pela atividade pecuária para pequenos produtores no semiárido, principalmente durante o período anual de déficit hídrico. Com isso, a primeira aproximação realizada neste estudo é importante para elucidar acerca das respostas da palma ao longo do ano e sob diversas situações de cultivo, como o desenvolvimento do dossel ao longo do tempo e a produção de biomassa.

Com os resultados obtidos neste estudo e de maneira geral, verificou-se que houve um bom ajuste dos parâmetros para a palma forrageira durante o ciclo, além dos diferentes sistemas produtivos analisados. Alguns parâmetros do modelo, no entanto, necessitam de ajustes para esta cultura em razão de características particulares como ciclo vegetativo e metabolismo fisiológico. A palma é uma cultura de ciclo longo, com aproximadamente dois anos em condições de sequeiro (Lima et al. 2016), mas com variações temporais de acordo com o manejo e condições climáticas (Amorim et al., 2017; Araújo Júnior et al., 2021), podendo-se reduzir ou aumentar o tempo para sua colheita. Com isso, essa cultura apresenta variações morfofisiológicas de acordo com as estações do ano, idade da planta,

ordem dos cladódios, cultivares, sistema de manejo agrícola, densidade de plantio e fatores bióticos (Dubeux et al., 2021a; Pessoa et al., 2020; Souza et al., 2017).

Diante essas características, parâmetros como a Produtividade Normalizada da Água (WP), mostraram-se limitantes por não ser possível a variação de seus valores no modelo durante o ciclo. Os parâmetros de cobertura inicial do dossel e emergência existentes no modelo também são relativos, já que, normalmente, o manejo de colheita da palma é realizado com a manutenção de cladódios basais, mantendo-se uma base estrutural da planta entre os ciclos (Jardim et al., 2021; Queiroz et al., 2015).

Eficiência do modelo na parametrização do AquaCrop para diferentes sistemas agrícolas em ambiente semiárido

As simulações de biomassa nos sistemas de cultivos dos clones de palma forrageira (MIU, IPA e OEM), irrigados com diferentes lâminas, apresentaram elevados índices estatísticos. O sistema com lâmina de irrigação de 120% da ET_c apresentou o menor valor de R^2 (0,87) e a maior inconstância em função da média ao longo do ciclo foi evidenciada nos tratamentos com irrigação de sequeiro (0% da ET_c), com NRMSE igual a 54,5%. Com isso, é possível afirmar que cenários com maiores estresses hídricos, principalmente déficit, interferem de forma negativa nos resultados finais da simulação de biomassa. Comportamentos semelhantes foram constatados por Heng et al., (2009), Sandhu e Irmak 2019 e Shirazi et al., (2021) para milho e soja que, de forma equivalente, relataram que o efeito inibitório na simulação sob estresse hídrico obtido no modelo foi superior ao obtido em campo.

Os modelos de simulação têm como principais características a representação baseada nas condições de crescimento fisiológico perfeitas, uma vez que estas podem ser diretamente afetadas por ervas daninhas, pragas, doenças e/ou outros fatores diversos que não são contabilizados (Hoefsloot et al., 2012). Com isso, mesmo que o *AquaCrop* seja calibrado a partir de condições reais de solo, podem ocorrer divergências nos resultados mediante situações extraordinárias oriundas de diferentes cenários agrícolas locais.

Os sistemas de cultivos de clones de palma forrageira com diferentes frequências de irrigações mostraram elevados valores de R^2 ($\leq 0,96$) na produção de biomassa, mas com elevada discrepância em relação à média, representada pelas médias do RMSE (6,4 g m⁻¹) e NRMSE (46,0%). Tal comportamento pode estar associado ao número de observações ao longo do ciclo, especificamente para este experimento, induzindo a ideia da necessidade do aumento de observações distribuídas uniformemente ao longo do ciclo.

Com relação as simulações das culturas forrageiras em condições de solo com e sem cobertura morta, foi observado melhores ajustes para as condições de solo sem cobertura morta em relação aos plantios com cobertura, com médias de $R^2 = 0,86$ e $NRMSE = 32,5 \text{ g m}^{-2}$ para CC, além de $R^2 = 0,99$ e $NRMSE = 5,33 \text{ g m}^{-2}$ para biomassa. Mesmo comportamento foi evidenciado por Feng et al. (2022) e Guo et al. (2018), que relataram os melhores ajustes em condições de plantios sem cobertura. Comportamento decorrido em razão do modelo *AquaCrop* acelerar a senescência do dossel sob situações de estresse hídrico.

O uso de cobertura morta proporciona maior eficiência no uso e conservação da umidade do solo, diminuindo a perda de água por evaporação, além de aumentar o conteúdo de matéria orgânica na camada superficial do solo. Com isso, proporciona melhores condições hídricas e aumento produtivo, como constatado por Jardim et al., (2021) avaliando a eficiência biológica e habilidade competitiva da consorciação entre sorgo e palma forrageira no semiárido, onde constataram que o consórcio proporcionou um aumento na produção de matéria fresca de 47% e matéria seca 3,5 vezes maior em relação ao cultivo exclusivo. Já Mupangwa et al., (2012) verificaram um aumento de 51% na produção de milho com cobertura ($2 - 4 \text{ Mg ha}^{-1}$).

O modelo *AquaCrop* simula o crescimento de cultivos agrícolas, mas ainda não é possível a simulação direta de sistemas de cultivos em consórcios. Com base nisso, algumas alternativas podem ser adotadas a fim de obter informações representativas sobre a previsão de safra desse sistema. Primeiramente pode ser realizada a calibração e validação das duas culturas individualmente, dentro do sistema consorciado, e consecutivamente a soma da biomassa de ambas os cultivos. Outra alternativa é a observação, por meio da calibração, da influência que uma cultura exerce na outra dentro do consórcio. Isso é possível no módulo “*Manejo de campo/Manejo de ervas daninhas*”, onde pode ser computado a interferência da cobertura vegetal de um cultivo no crescimento do outro cultivo.

Conclusões

No nosso estudo, buscamos calibrar e validar o modelo *AquaCrop* para sistemas agrícolas com cultivos de palma forrageira, milheto e sorgo sob diferentes arranjos produtivos (cultivos solteiros, consórcios e, ou, com e sem uso de cobertura morta) situados na região Semiárida do Brasil. A parametrização e a validação do *AquaCrop* para

os diferentes sistemas produtivos com plantas forrageiras, mostrou-se eficiente e aplicável para regiões de clima semiárido.

O modelo limita-se a simular o crescimento de cultivos de forma individual, no entanto é possível realizar esse processo para cultivos individuais dentro de sistemas consorciados. Para tanto é necessária a calibração dos parâmetros para as condições em consórcio, verificando os fatores redutores para as culturas individuais e o acréscimo com o somatório produtivo dos cultivos.

Para períodos do ciclo da cultura com maior escassez hídrica ou cultivos em situações de déficit hídrico, o modelo apresenta resultados de simulações com maiores inconsistências e maiores erros em relação aos sistemas com irrigações plenas. O modelo simula o crescimento de cultivos e/ou sistemas de cultivos sem cobertura morta de forma mais eficiente que em condições de cultivos com cobertura.

Por fim, os resultados deste estudo proporcionam uma importante base para futuras pesquisas e destacam a necessidade de aperfeiçoamento na parametrização, considerando aspectos mais amplos de ambientes e variáveis de cultivos forrageiros, além da expansão para sistemas agrícolas resilientes. A compilação dessas informações e a otimização dos modelos biofísicos são fundamentais para a quantificação das lacunas produtivas e a identificação dos principais fatores redutores.

Referências

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., Ahmad, T. (2012). Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 110, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Adekalu, K. O., Osunbitan, J. A. (2020). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2020.10.002>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M. (2013). Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3–4), 407–427. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- Amorim, D. M., Silva, T. G. F., Pereira, P. C., Souza, L. S. B., Minuzzi, R. B. (2017). Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 47(1), 62–71. <https://doi.org/10.1590/1983->

- Araújo Júnior, G. D. N., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Santos, J. P. A. S., Jardim, A. M. R. F., Alves, C. P., Alves, H. K. M. N. (2021). Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. *Bragantia*, 80, 1–12. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>
- Araújo Júnior, G. N., Jardim, A. M. R. F., Silva, M. J., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Costa, S. A. T., Cunha, M. V., Simões, A. N., Silva, J. R. I., Souza, L. S. B., Silva, T. G. F. (2021). Growth dynamics and accumulation of forage mass of forage cactus clones as affected by meteorological variables and water regime. *European Journal of Agronomy*, 131(April). <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126375>
- Araújo Júnior, G. N., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Alves, C. P., Salvador, K. R. S., Souza, C. A. A., Montenegro, A. A. A., Silva, M. J. (2021). Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. *Journal of Arid Environments*, 190. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2021.104510>
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838–1846. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.06.021>
- Araya, A., Kisekka, I., Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Bello, Z. A., Walker, S. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for pearl millet (*Pennisetum glaucum*). *Crop and Pasture Science*, 67(9), 948–960. <https://doi.org/10.1071/CP15226>
- Browne, M. W., Cudeck, R. (1992). Alternative Ways of Assessing Model Fit. *Sociological Methods & Research*, 21(2), 230–258. <https://doi.org/10.1177/0049124192021002005>
- Camargo, A. P., Sentelhas, P. C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 5(1), 89–97.
- Chibarabada, T. P., Modi, A. T., Mabhaudhi, T. (2020). Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107850.

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107850>

- Diniz, W. J. S., Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. S., Santos, D. C., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724–733. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900004>
- Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F., Cunha, M. V., Santos, D. C., Souza, R. T. A., Mello, A. C. L., Souza, T. C. (2021). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275(February), 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
- Er-Raki, S., Bouras, E., Rodriguez, J. C., Watts, C. J., Lizarraga-Celaya, C., Chehbouni, A. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for simulating table grapes growth and water productivity in an arid region of Mexico. *Agricultural Water Management*, 245, 378–3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106585>
- Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z., Xu, H. (2022). Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*, 261, 107372. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107372>
- Guo, D. X., Chen, C. F., Guo, P. Y., Yuan, X. Y., Xing, X. G., Ma, X. Y. (2018). Evaluation of AquaCrop model for foxtail millet (*Setaria italica*) growth and water use with plastic film mulching and no mulching under different weather conditions. *Water (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/w10070836>
- Guo, D., Zhao, R., Xing, X., Ma, X. (2019). Global sensitivity and uncertainty analysis of the AquaCrop model for maize under different irrigation and fertilizer management conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 66(8), 1115–1133. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1657845>
- Guo, P., Harding, R., Higginson, I. J. (2018). Palliative care needs of heart failure patients in China: Putting people first. *Current Opinion in Supportive and Palliative Care*, 12(1), 10–15. <https://doi.org/10.1097/SPC.0000000000000315>
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. *Water SA*, 43(2), 209. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i2.05>
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hoefsloot, P., Ines, A., Dam, J. Van, Duveiller, G., Kayitakire, F., Hansen, J. (2012).

Combining Crop Models and Remote Sensing for Yield Prediction: Concepts, Applications and Challenges for Heterogeneous Smallholder Environments.
<https://doi.org/10.2788/72447>

- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B. (2021). Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 188(September 2020), 104464. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>
- Jin, X., Li, Z., Nie, C., Xu, X., Feng, H., Guo, W., Wang, J. (2018). Parameter sensitivity analysis of the AquaCrop model based on extended fourier amplitude sensitivity under different agro-meteorological conditions and application. *Field Crops Research*, 226(July), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.07.002>
- Kanda, E. K., Senzanje, A., Mabhaudhi, T. (2021). Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 124, 102941. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102941>
- Karuku, G. N., Mbindah, B. A. (2020). Validation of aquacrop model for simulation of rainfed bulb onion (*Allium cepa* L.) yields in west ugenya sub-county, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 23(06), 1–11.
- Lauriault, L. M., Schmitz, L. H., Cox, S. H., Scholljegerdes, E. J. (2021). A Comparison of Pearl Millet and Sorghum–Sudangrass Pastures during the Frost-Prone Autumn for Growing Beef Cattle in Semiarid Region. *Agriculture 2021*, Vol. 11, Page 541, 11(6), 541. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11060541>
- Lima, G. F. D. C., Rego, M. M. T., Dantas, F. D. G., Lôbo, R. N. B., Silva, J. G. M., Aguiar, E. M. (2016). Morphological characteristics and forage productivity of irrigated cactus pear under different cutting intensities. *Revista Caatinga*, 29(2), 481–488. <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n226rc>
- Lima, L. R., Silva, T. G. F., Jardim, A. M. R. F., Souza, C. A. A., Queiroz, M. G., Tabosa, J. N. (2018). Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,

- 22(2), 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V22N2P113-118>
- Martins, M. A., Tomasella, J., Rodriguez, D. A., Alvalá, R. C. S., Giarolla, A., Garofolo, L. L., Júnior, J. L. S., Paolicchi, L. T. L. C., Pinto, G. L. N. (2018). Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, 160, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.002>
- Moraes, G. S. O., Guim, A., Tabosa, J. N., Chagas, J. C. C., Almeida, M. P., Ferreira, M. A. (2019). Cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions? *Livestock Science*, 221, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.026>
- Mudgal, V., Mehta, M. K., Rane, A. S. (2018). Lentil straw (*Lens culinaris*): An alternative and nutritious feed resource for kids. *Animal Nutrition*, 4(4), 417–421. <https://doi.org/10.1016/J.ANINU.2018.04.009>
- Mupangwa, W., Twomlow, S., Walker, S. (2012). Reduced tillage, mulching and rotational effects on maize (*Zea mays* L.), cowpea (*Vigna unguiculata* (Walp) L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. (Moench)) yields under semi-arid conditions. *Field Crops Research*, 132, 139–148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.020>
- Nunes, H. G. G. C., Farias, V. D. S., Sousa, D. P., Costa, D. L. P., Pinto, J. V. N., Moura, V. B., Teixeira, E. O., Lima, M. J. A., Ortega-Farias, S., Souza, P. J. O. P. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. *Agricultural Water Management*, 252, 106880. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106880>
- Nyakudya, I. W., Stroosnijder, L. (2014). Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 146, 280–296. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.024>
- Paredes, P., Torres, M. O. (2017). Parameterization of AquaCrop model for vining pea biomass and yield predictions and assessing impacts of irrigation strategies considering various sowing dates. *Irrigation Science*, 35(1), 27–41. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0520-x>
- Pessoa, D. V., Andrade, A. P., Magalhães, A. L. R., Teodoro, A. L., Santos, D. C., Araújo, G. G. L., Medeiros, A. N., Nascimento, D. B., Valença, R. L., Cardoso, D. B. (2020). Forage nutritional differences within the genus *Opuntia*. *Journal of Arid Environments*, 181(June), 104243. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104243>
- Pinheiro, A. G., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., Silva, T. G. F. (2021). Lacunas de produtividades e

- estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira - Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(4), 2403–2426. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2403-2426>
- Pinheiro, K. M., Silva, T. G. F., Carvalho, H. F. S., Santos, J. E. O., Morais, J. E. F., Zolnier, S., Santos, D. C. (2014). Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(12), 939–947. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S., Lima, L. R., Alves, J. O. (2015). Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 931–938. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Sandhu, R., Irmak, S. (2019). Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. *Agricultural Water Management*, 223, 105687. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105687>
- Shirazi, S. Z., Mei, X., Liu, B., Liu, Y. (2021). Assessment of the AquaCrop Model under different irrigation scenarios in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 257(August), 107120. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107120>
- Silva, T. G. F., Miranda, K. R., Santos, D. C., Queiroz, M. G., Silva, M. C., Cruz Neto, J. F., Araújo, J. E. M. (2014). Área do cladódio de clones de palma forrageira: modelagem, análise e aplicabilidade. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 9(4), 633–641. <https://doi.org/10.5039/agraria.v9i4a4553>
- Silva, T. G. F., Queiroz, M. G., Zolnier, S., Souza, L. S. B., Souza, C. A. A., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Steidle Neto, A. J., Santos, T. S., Melo, A. L., Cruz Neto, J. F., Silva, M. J., Alves, H. K. M. N. (2021). Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. *Soil and Tillage Research*, 207, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104852>
- Souza, M. S., Júnior, G. N. A., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Silva, G. I. N., Araújo, G. G. L., Campos, F. S., Leite, M. L. M. V., Tabosa, J. N., Silva, T. G. F. (2022).

- Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>.
<https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>
- Souza, T. C., Santos, M. V. F., Dubeux Júnior, J. C. B., Lira, M. A., Santos, D. C., Cunha, M. V., Lima, L. E., Silva, R. R. (2017). Productivity and nutrient concentration in spineless cactus under different fertilizations and plant densities. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, 12(4), 555–560. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i4a5473>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Taylor, J. R. N. (2019). Sorghum and Millets. In *Sorghum and Millets* (p. 1–21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00001-0>
- Upreti, D., Pignatti, S., Pascucci, S., Tolomio, M., Li, Z., Huang, W., & Casa, R. (2020). A Comparison of moment-independent and variance-based global sensitivity analysis approaches for wheat yield estimation with the Aquacrop-OS model. *Agronomy*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10040607>
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., Garcia Vila, M., Mejias Moreno, P. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*, 62, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>
- Veloso, G. A., Ferreira, M. E., Ferreira Júnior, L. G., Silva, B. B. (2020). Modelling gross primary productivity in tropical savanna pasturelands for livestock intensification in Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100288>
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Xing, H., Xu, X., Li, Z., Chen, Y., Feng, H., Yang, G., Chen, Z. (2017). Global sensitivity analysis of the AquaCrop model for winter wheat under different water treatments based on the extended Fourier amplitude sensitivity test. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(11), 2444–2458. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61626-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61626-X)
- Yang, J. M., Yang, J. Y., Liu, S., Hoogenboom, G. (2014). An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*, 127, 81–89. <https://doi.org/10.1016/J.AGSY.2014.01.008>

CAPÍTULO IV

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DA MASSA DE FORRAGEM DE SISTEMAS
DE CULTIVO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO COM O MODELO AQUACROP**

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DA MASSA DE FORRAGEM DE SISTEMAS DE CULTIVO EM AMBIENTE SEMIÁRIDO COM O MODELO AQUACROP

Resumo: A estimativa da biomassa de forrageiras e a definição do calendário agrícola de sistemas de cultivo em diferentes áreas de ambientes semiáridas é muito importante para o planejamento e a tomada de decisão das atividades agropecuárias. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo aplicar o modelo AquaCrop na identificação das melhores estratégias de cultivos de forrageiras para cada os municípios destacados, identificando fatores limitante, e recomendar o calendário agrícola para os respectivos cenários. O estudo foi realizado a partir de simulações com o modelo AquaCrop para 14 localidades representativas do semiárido brasileiro. Foram simulados 29 sistemas produtivos e diferentes datas de cultivos. O modelo AquaCrop se mostrou eficiente na simulação de diferentes sistemas agrícolas com forrageiras para a região do semiárido. A partir da simulação constatou-se que o consórcio palma-sorgo irrigado pode proporcionar aumento de até 44% e 89% na oferta de forragem em relação aos cultivos individuais da palma e do sorgo, respectivamente. O uso de irrigação no cultivo da palma forrageira proporcionou aumento de biomassa de aproximadamente 150%. Dentre os sistemas, o clone OEM foi responsável pelos melhores resultados produtivos, independente do arranjo. O adensamento de plantio proporcionou aumento na produtividade final dos sistemas de cultivos. Todos os municípios apresentaram cenários agrícolas e de manejo com características potencias para cultivo de forrageiras, desde que obedecidos os intervalos de plantios. Com isso, conclui-se que o modelo AquaCrop é uma eficiente ferramenta na investigação e previsão de safras para culturas forrageiras em ambiente semiárido, identificando sistemas agrícolas e datas de plantios para diferentes condições ambientais.

Palavras-chave: modelo de crescimento, cenários produtivos, arranjos de cultivos, calendário agrícola, semiárido.

ESTIMATE OF FORAGE MASS PRODUCTION OF CROP SYSTEMS IN SEMIARID ENVIRONMENT WITH THE AQUACROP MODEL

Abstract: Estimating forage biomass and defining the agricultural calendar of cropping systems in different areas of semiarid environments is very important for planning and decision-making in agricultural activities. In this sense, the present study aimed to apply the AquaCrop model in identifying the best forage cultivation strategies for each of the highlighted municipalities, identifying limiting factors, and recommending the agricultural calendar for the respective scenarios. The study was carried out based on simulations with the AquaCrop model for 14 representative locations in the Brazilian semiarid region. 29 production systems and different growing dates were simulated. The AquaCrop model proved to be efficient in simulating different agricultural systems with forages for the semiarid region. From the simulation it was verified that the irrigated cactus forage - sorghum intercropping can provide an increase of up to 44% and 89% in the forage offer in relation to the individual palm and sorghum crops, respectively. The use of irrigation in the cultivation of cactus forage provided an increase in biomass of approximately 150%. Among the systems, the OEM clone was responsible for the best productive results, regardless of the arrangement. Planting density provided an increase in the final productivity of cropping systems. All municipalities presented agricultural and management scenarios with potential characteristics for forage cultivation, as long as the planting intervals are obeyed. With this, it is concluded that the AquaCrop model is an efficient tool in the investigation and forecast of harvests for forage crops in a semiarid environment, identifying agricultural systems and planting dates for different environmental conditions.

Keywords: growth model, productive scenarios, crop arrangements, agricultural calendar, semiarid.

Introdução

O Semiárido brasileiro (SEB) tem área de 982.566 km², que corresponde a 18% do território nacional. É classificado como a maior e mais úmida região semiárida do mundo, com pluviosidade média anual variando de 400 a 800 mm (Alvares et al. 2013; Silva et al. 2021). O SEB possui diferentes regimes de chuvas identificados em basicamente três zonas geográficas: (a) zona Norte (engloba a maior parte do semiárido), as chuvas podem se concentrar no período de dezembro a maio, e são influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); (b) zona Sul-Sudeste, o maior regime pluviométrico ocorre de novembro a fevereiro, e estão associadas pelas frentes frias provenientes da Região Sul do Brasil; (c) zona Leste, o período de maior ocorrência de chuvas ocorre entre abril a agosto, motivado principalmente pelas diferenças térmicas entre o Oceano Atlântico e as terras próximas (Cunha et al., 2015).

O déficit hídrico associado à manejos inadequados limita a produção de forragem e resulta no desequilíbrio entre oferta e demanda na alimentação animal (Bell et al., 2018; Moraes et al., 2019; Pinheiro et al., 2021; Veloso et al., 2020). Com isso, a melhor forma de aumentar a produtividade de forrageiras é minimizar as lacunas causadas pelas limitações hídricas e de manejo. A identificação dessas lacunas, conceituada mundialmente por “*Yield Gap*”, são importantes na identificação do potencial biofísico disponível para elevar a produção agrícola em determinado local, estimando a diferença entre o rendimento potencial e o rendimento real (Beza et al., 2017; Dias e Sentelhas, 2018; Monteiro et al., 2020; Sentelhas et al., 2015).

Nas regiões semiáridas, o início do cultivo no período adequado é fundamental para a produtividade final, pois favorece condições adequadas para o desenvolvimento do dossel, evitando estresses térmicos e hídricos nos principais estágios da cultura (Santos et al., 2017; Zhang et al., 2019). No entanto, ainda são poucas as informações aprofundadas sobre o calendário agrícola de culturas forrageiras (palma forrageira, sorgo e milho) para o semiárido brasileiro, sendo limitada ao Zoneamento Agrícola de Risco Climático - ZARC (MAPA, 2022). O ZARC apresenta relevante papel como instrumento de gestão dos riscos na agricultura, mas há a necessidade do aprimoramento das informações interespecíficas para essas culturas e arranjos agrícolas.

Diante do desafio de otimizar o aproveitamento dos recursos naturais e a eficiência do uso da terra e da água, é fundamental a adoção de práticas que melhorem a resiliência agrícola. Essas práticas devem estabelecer níveis aceitáveis de produtividade, mesmo em condições ambientais limitantes, e condicionar maior estabilidade agrícola anual e

socioeconômica para a agricultura de subsistência (Araújo Júnior et al., 2021; Dias-Martins et al., 2018; Diniz et al., 2017; Edvan et al., 2020; Jardim et al., 2021; Silva et al., 2021).

Práticas agrícolas são citadas para distintas condições ambientais e de manejo. Dentre as recomendadas para ambientes semiáridos, destacam-se a adoção de culturas forrageiras adaptadas ao clima, arranjo diversificado e associado entre espécies, além da reposição hídrica por meio de irrigação (Araújo Júnior et al., 2021; Queiroz et al., 2015; Diniz et al., 2017; Jardim et al., 2021).

Vários estudos recomendam a palma forrageira (*Nopalea* spp. e *Opuntia* spp.), cactácea com metabolismo ácido das crassuláceas, que se destaca pela sua alta eficiência no uso da água e seu alto potencial produtivo, mesmo durante longos períodos de estiagem (Queiroz et al., 2015; Moraes et al., 2019; Pessoa et al., 2020). Vale destacar ainda a importância das culturas do sorgo e milho para a região, pela sua importância nutricional e alta resposta produtiva, proveniente de seu metabolismo C₄ (Alves et al., 2022; Jardim et al., 2020).

Mediante as limitações hídricas da região semiárida, estudos evidenciaram a importância do adensamento e consorciação entre cultivos no aumento do aporte forrageiro e equilíbrio nutricional (Camelo et al., 2021; Jardim et al., 2021), além da elevação do nível de produtividade quando manejados sob condições irrigadas com base na ET_c (Amorim et al., 2017; Araújo Júnior et al., 2021; Souza et al., 2022; Jardim et al., 2021; Lima et al., 2018; Pereira et al., 2020; Queiroz et al., 2015).

Nesse contexto, o modelo de simulação AquaCrop, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), pode ser aplicado para determinar os arranjos produtivos de forragens mais adequados para diferentes locais, além de estimar cenários produtivos mediante a adoção de práticas agrícolas. O AquaCrop foi desenvolvido para simular os efeitos ocasionados pelas condições ambientais e manejos agrícolas, consistindo em três módulos: determinação do balanço hídrico do solo, simulação do crescimento das culturas e a composição atmosférica (Zhu et al., 2021). Além disso, o AquaCrop apresenta resultados satisfatórios com a entrada de relativamente poucos dados (Heng et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009).

O AquaCrop já foi aplicado para múltiplas culturas, como batata (Linker et al., 2016; Razzaghi et al., 2017), cana de açúcar (Bahmani e Eghbalian, 2018; Farooq & Gheewala, 2020), girassol (Saab et al., 2014), feijão (Magalhães et al., 2019), soja (Adeboye et al., 2021; Giménez et al., 2017), milho (Bello e Walker, 2016; D. X. Guo et al., 2018), milho (Van Gaalen et al., 2015; Zhu et al., 2021), sorgo (Araya et al., 2016;

Hadebe et al., 2017), dentre outras culturas. Contudo, são escassos os trabalhos aplicados do modelo para a palma forrageira, além de ampliar o conhecimento das repostas produtivas do sorgo, milho e sistemas de cultivos para ambientes do semiárido brasileiro em condições de sequeiro ou irrigadas.

O entendimento dessas respostas é fundamental para planejamento das tomadas de decisões e aplicações de recursos. Portanto, a partir deste estudo, espera-se que a aplicação do modelo AquaCrop indique os sistemas produtivos mais eficientes para condições ambientais do semiárido brasileiro e otimize o calendário agrícola para essas forrageiras. Neste estudo, aplicamos o modelo AquaCrop para simular as melhores épocas de plantios entre arranjos de cultivos com palma forrageira e sorgo sob distintos manejos agrícolas.

Material e métodos

Descrição da área de Estudo

A aplicação do modelo AquaCrop foi realizada para as condições ambientais de 14 localidades situadas na região do semiárido brasileiro, onde são identificadas diferentes magnitudes pluviométricas e térmicas, além da disponibilidade de dados meteorológicos históricos. Os pontos estão localizados em seis Estados: Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Piauí (Figura 1).

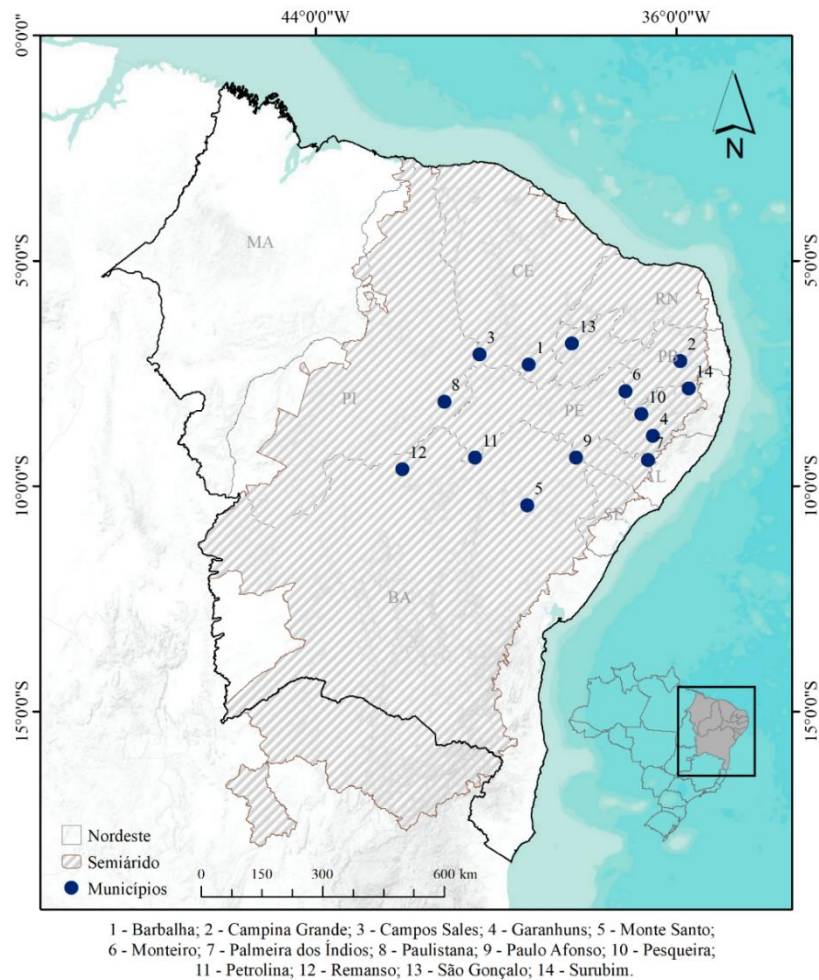


Figura 1. Localização geográfica dos municípios para aplicação do modelo AquaCrop.

Dados climáticos

Os dados climáticos de temperatura, precipitação e evapotranspiração para todos os municípios foram obtidos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022). As séries históricas de dados foram organizadas com frequências de informações diárias e durações aproximadas de 57 anos (1961 – 2018). Com isso, foi realizada uma compilação das informações, convertendo as variáveis para escalas mensais, por meio da média mensal histórica. Essa ação auxiliou na análise da distribuição do clima ao longo do ano para cada município e, com isso, proporcionou possíveis respostas para comportamentos e respostas produtivas das culturas em determinados períodos anuais.

Descrição das condições de cultivos e arranjos agrícolas utilizadas nas simulações

A partir do estudo conduzido por Pinheiro et al. (2022), que realizaram a parametrização do modelo AquaCrop para diferentes culturas forrageiras e sistemas agrícolas foram selecionados os arranjos com as melhores respostas produtivas para as condições de clima semiárido.

Com isso, foram destacadas e aplicadas seis condições de cultivos e 29 arranjos agrícolas para todos os municípios. Essas condições de cultivos apresentaram diferentes características com arranjos das culturas, adensamentos, ciclos vegetativos, e reposições hídricas com base na cultura principal (palma forrageira).

Vale destacar que esses cenários agrícolas simulados são decorrentes de condições de cultivo e manejos agrícolas em condições adequadas, conforme ressaltam (Alves et al., 2022). Isso implica nas condições de cultivos, adubação, espaçamentos e controle de pragas e plantas daninhas conforme necessidade, condicionando desenvolvimento ideal das plantas.

Na Tabela 1 são destacadas as condições e arranjos agrícolas aplicados nas simulações de produção de biomassa para as distintas localidades da região semiárida brasileira.

Tabela 1. Descrição das unidades produtivas com palma forrageira e sorgo, compreendendo: consórcio de culturas, distintos clones, diferentes regimes hídricos, frequências de irrigação, adensamento de plantio

<i>Condição de Cultivo</i>	<i>Densidade de plantas (plantas ha⁻¹)</i>	<i>Ciclo vegetal (dias)</i>	<i>Reposição hídrica</i>	<i>Uso de cobertura</i>	<i>Arranjos produtivos</i>
<i>Consórcio palma forrageira-sorgo sob condições de irrigação complementar</i>	<i>Palma - 50.000 Sorgo - 200.000</i>	<i>Palma forrageira – 363 Sorgo - 113</i>	<i>0% ETc 80% ETc</i>	<i>Sem cobertura</i>	<i>IPA-SE MIU-SE OEM-SE 267-SE P288-SE SF11-SE IPA-IE MIU-IE OEM-IE 467-IE P288-IE SF11-IE IPA-SF11-S MIU-288-S OEM-SF11-S IPA-SF11-I MIU-288-I OEM-SF11-I</i>
<i>Clones de palma forrageira sob distintos regimes hídricos</i>	<i>Palma - 50.000</i>	<i>Palma forrageira – 423</i>	<i>80% ETc</i>	<i>Sem cobertura</i>	<i>IPA-80% MIU-80% OEM-80%</i>
<i>Clones de palma forrageira submetida a frequências de irrigação</i>	<i>Palma - 50.000</i>	<i>Palma forrageira – 417</i>	<i>Lâmina fixa de 14 mm Frequências IPA - 7 dias OEM - 14 dias MIU - 28 dias</i>	<i>Sem cobertura</i>	<i>IPA-07D OEM-14D MIU-28D</i>
<i>Palma forrageira em condições com e sem cobertura morta do solo</i>	<i>Palma - 31.250</i>	<i>Palma forrageira – 352</i>	<i>0% ETc 120% ETc</i>	<i>Cobertura morta (15 Mg ha⁻¹)</i>	<i>OEM-SCC OEM-ICC</i>
<i>Palma forrageira sob irrigação complementar</i>	<i>Palma - 41.667</i>	<i>Palma forrageira - 414</i>	<i>100% ETc</i>	<i>Sem cobertura</i>	<i>OEM-IE</i>
<i>Adensamento da palma em condições de sequeiro e irrigado</i>	<i>Palma - 200.000</i>	<i>Palma forrageira - 492</i>	<i>0% ETc 100% ETc</i>	<i>Sem cobertura</i>	<i>OEM-SAD. OEM-IAD.</i>

Os sistemas foram aplicados como plantio “Sequeiro e Exclusivo” (IPA-SE, MIU-SE, OEM-SE, 267-SE, P288-SE, SF11-SE); “Irigados e Exclusivo” (IPA-IE, MIU-IE, OEM-IE, 467-IE, P288-IE, SF11-IE); “Consortiado e Sequeiro” (IPA-SF11-S, MIU-288-S, OEM-SF11-S); “Consortiado e Irrigado” (IPA-SF11-I, MIU-288-I, OEM-SF11-I).

Para os sistemas com manejos de irrigações com lâminas e frequências foram aplicadas as lâminas de 80% da ET_c (IPA-80%, MIU-80%, OEM-80%), além dos sistemas com o clone IPA e frequência de irrigações de 7 dias (IPA-07D), Miuda com 28 dias (MIU-28D) e OEM com 14 dias (OEM-14D). Ainda como influência da cobertura vegetal, definiu-se a OEM sob condições de “Sequeiro e Com Cobertura” (OEM-SCC) e “Irigado e Com Cobertura” (OEM-ICC).

Além dos sistemas com o clone OEM com irrigação complementar (OEM-IE) e sob condições de “Sequeiro a Adensado” (OEM-SAD.) e “Irigado e Adensado” (OEM-IAD).

Construção do calendário agrícola

As simulações ocorreram de forma a identificar as variações e impactos ocasionados pelo calendário agrícola dos diferentes sistemas de cultivos analisados, expondo os riscos com intervalo entre 0–1, mínimo e máximo desempenho produtivo, respectivamente.

Para o cultivo consorciado entre a palma forrageira e o sorgo, foi estabelecido que o plantio do sorgo seria realizado quatro meses após o início do ciclo da palma, já que o crescimento inicial do sorgo é mais acelerado que o da palma. Esse intervalo, atribuído mediante análise da pesquisa realizada por Jardim et al. (2021) proporcionaria maior estabilidade da palma e permitiria o cultivo e crescimento do sorgo.

Com isso, foi simulado o início do ciclo dos sistemas de cultivos para o dia 15 de todos os meses do ano (15/01, 15/02, 15/03, 15/04, 15/05, 15/06, 15/07, 15/08, 15/09, 15/10, 15/11, 15/12) e para todos os locais.

Descrição do Modelo AquaCrop, entrada de dados e aplicação para as 14 localidades em estudo

O modelo AquaCrop é um modelo de crescimento e desenvolvimento da cultura, proposto pela FAO (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009), desenvolvido para analisar a influência ocasionada pelas condições climáticas e de

manejo agrícola na resposta produtiva das culturas. Basicamente, o modelo AquaCrop (versão 6.1 – Nr. 02052018) é composto por três módulos: composição atmosférica, balanço hídrico e crescimento das culturas (Zhu et al., 2021).

O modelo tem desempenho importante na separação da evapotranspiração (ET) em evaporação do solo (E) e transpiração da cultura (Tr), ampliando o conhecimento do real efeito da água no consumo produtivo da planta (Steduto et al., 2009). Com isso, o rendimento final é expresso pela Biomassa (B) e Índice de Colheita (HI), como ilustrado nas equações 1 e 2, respectivamente.

$$Y = B \times HI \quad (1)$$

$$B = WP \times \sum Tr \quad (2)$$

em que, Y é o rendimento final ($Mg\ ha^{-1}$), B é a biomassa ($Mg\ ha^{-1}$), HI é o índice de colheita, WP é o parâmetro de produtividade da água ($kg\ m^{-2}\ mm^{-1}$), Tr é colheita mediante transpiração (mm).

Os dados necessários para entrada no modelo foram divididos em cinco conjuntos: 1 - dados climáticos; 2 - dados de irrigação; 3 – dados de solo; 4 – parâmetros das culturas e sistemas produtivos; 5 – dados de manejo agrícola.

Dados Climáticos

O conjunto de dados climáticos foi constituído pelas variáveis diárias de temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação e evapotranspiração de referência, sendo a última estimada pela equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

Dados de Irrigação

A estimativa de irrigação para cada município foi realizada com base na Evapotranspiração de cultura (ET_c).

Dados de Solo

O arquivo de solo foi organizado de acordo com a base de dados nacional de perfis do solo (Cooper et al., 2005) e implementado constando as informações necessárias exigidas pelo modelo, como textura, profundidade média do solo, capacidade de campo, ponto de murcha e condutividade hidráulica para cada município (Tabela 2).

Tabela 2. Principais características dos perfis dos solos para os municípios analisados

Municípios	Textura	Prof. solo --- m ---	PM ---- % ----	CC	Cond. Hidráulica ---- mm h ⁻¹ ----
Pesqueira	Arenoso	1.20	4.40	10.00	116.59
Petrolina	Fanco argilo arenoso	1.50	14.30	25.90	16.24
Surubim	Arenoso	1.50	4.40	9.80	118.19
Garanhuns	Argiloso	1.90	8.20	25.60	28.56
Paulo Afonso	Franco arenoso	0.55	9.20	17.60	46.23
Palmeira dos Índios	Franco arenoso	1.50	6.90	12.50	54.78
Barbalha	Argilo arenoso	1.68	14.90	26.00	15.00
Remanso	Franco arenoso	0.50	11.50	19.80	31.95
Campos Sales	Franco arenoso	1.10	10.30	18.30	39.59
Paulistana	Fanco argilo arenoso	0.95	15.40	26.30	13.67
Monteiro	Fanco argiloso	0.85	20.90	33.60	4.64
Campina Grande	Franco arenoso	0.40	10.40	20.60	34.18
Monte Santo	Franco arenoso	0.80	12.10	21.30	27.35
São Gonçalo	Franco arenoso	0.55	5.20	14.30	83.02

Parâmetros das culturas

Os parâmetros específicos foram previamente parametrizados para cada arranjo produtivo (Pinheiro, 2022, vê Capítulo III), de acordo com a Tabela 3. Diferentemente dos demais arquivos de clima e solo, o arquivo com os parâmetros das culturas foi igual para todos os municípios, ou seja, somente diferenciando de acordo com os arranjos agrícolas.

Tabela 3. Parâmetros iniciais utilizados na calibração do modelo *AquaCrop*

Símbolo	Descrição
Temperatura do ar	
T_b	Temperatura basal (°C)
T_B	Temperatura máxima (°C)
Desenvolvimento do dossel	
-	Tempo entre plantio e emergência (dias ou °C dia ⁻¹)
-	Número de plantas por hectare
CC_0	Cobertura inicial do dossel com 90% de emergência das plantas (%)
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel (relação da cobertura do solo por dia ou °C dia ⁻¹)
CC_x	Máxima cobertura do dossel (%)
-	Tempo do plantio até o início da senescência (dias ou °C dia ⁻¹)
CDC	Coefficiente de declínio do dossel (Relação da cobertura do solo por dia ou °C dia ⁻¹)
-	Tempo entre semeadura e maturação (dias ou °C dia ⁻¹)
Desenvolvimento da zona radicular	
Z_{min}	Profundidade radicular mínima efetiva (m)
Z_{max}	Profundidade radicular máxima efetiva (m)
-	Fator de expansão da zona radicular
-	Tempo entre semeadura e máxima profundidade radicular
Transpiração da cultura	
Kcb_x	Coefficiente da cultura com máxima expansão do dossel
f_{Kc}	Coefficiente de declínio da cultura como resultado da idade, deficiência de nitrogênio, etc. (% dia ⁻¹)
-	Efeito da cobertura do dossel na redução da evaporação do solo no final do ciclo
Produção de biomassa e rendimento	
WP^*	Produtividade de água normalizada para ET ₀ e CO ₂ (g m ⁻²)
Índice de colheita	
HI_0	Índice de colheita de referência
Estresse hídrico	
$P_{exp, upper}$	Limite superior da depleção da água no solo para a expansão do dossel
$P_{exp, lower}$	Limite inferior da depleção da água no solo para a expansão do dossel
-	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a expansão do dossel
P_{est}	Limite superior de depleção da água no solo para controle estomático
-	Fator do coeficiente de estresse hídrico para controle estomático
P_{sen}	Limite superior de depleção da água no solo para senescência do dossel
-	Fator do coeficiente de estresse hídrico para a senescência do dossel
Estresse pela temperatura do ar	
-	Mínimo necessário para a produção de biomassa total (°C dia ⁻¹)

Fonte: Hadebe et al. (2017); Heng et al. (2009).

Resultados

Especificação das características climáticas nas diferentes localidades

De forma geral, todos os municípios analisados apresentaram maiores concentrações pluviométricas no primeiro semestre do ano, com aproximadamente 72,6% do volume de chuvas registradas nesse período (Figura 2). Entre os municípios, foram constatados volumes pluviométricos inferiores a 500 mm ano⁻¹ (Petrolina) até volumes superiores a 900 mm ano⁻¹ (Barbalha, Garanhuns e São Gonçalo).

O comportamento anual da temperatura e ET₀ ocorre de forma paralela. Entre os municípios Garanhuns registrou a menor temperatura média anual (21,9 °C) e Paulistana a maior temperatura média anual (27,5 °C). Ao longo do ano a menor variação da temperatura média anual (1 °C) foi em Remanso e a maior variação média anual (4,3 °C) em Petrolina.

A associação dessas variáveis impactou diretamente na magnitude das perdas de água por evaporação e transpiração, ocasionando valores de ET₀ máximas de aproximadamente 6,61 mm dia⁻¹ em Paulistana, registradas no mês de outubro. Todavia, temperaturas amenas e maiores volumes de precipitação proporcionaram perdas máximas por ET₀ de apenas 4,76 mm dia⁻¹ em Garanhuns, registradas em dezembro.

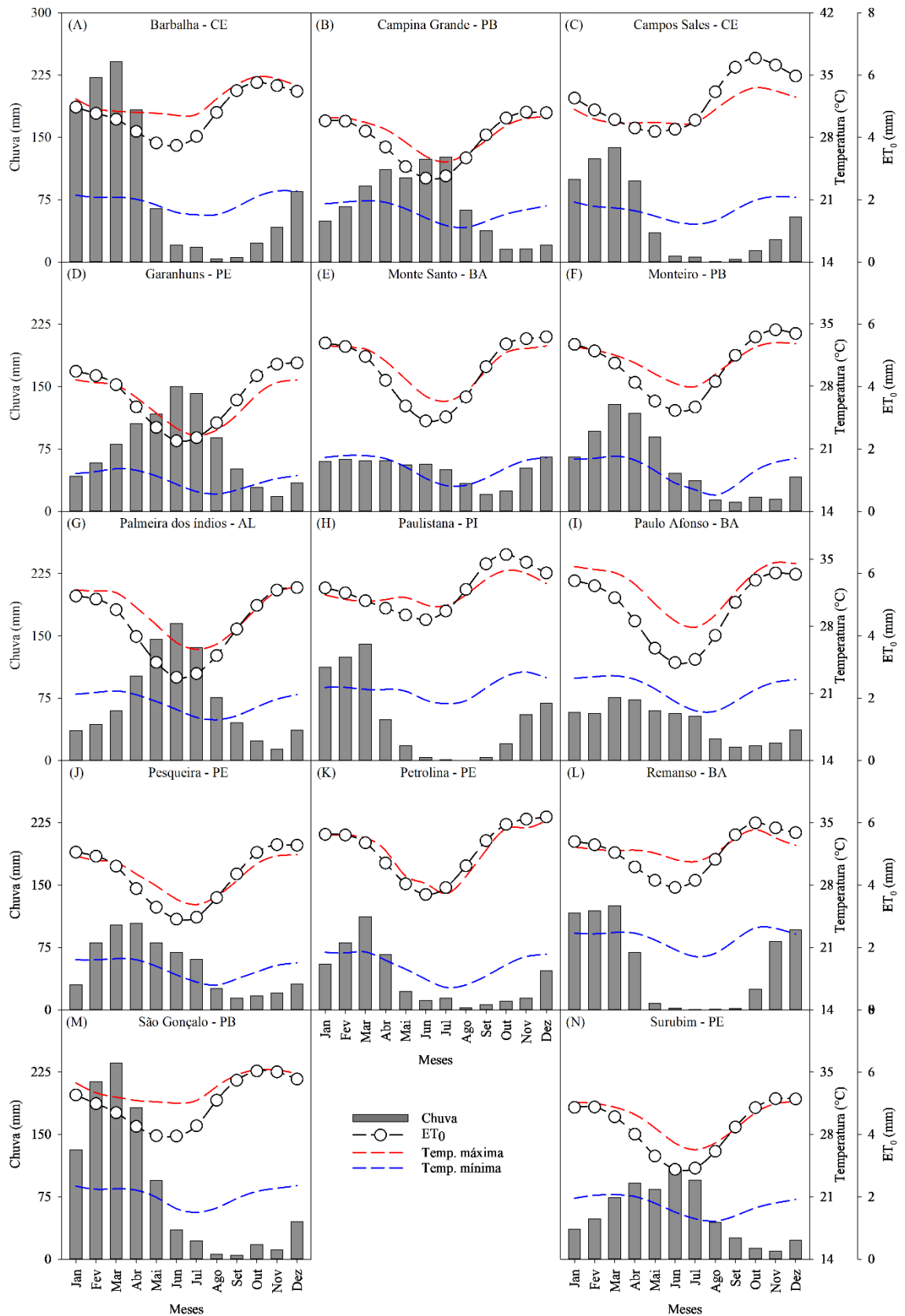


Figura 2. Distribuição da média histórica mensal das variáveis climáticas de temperatura (°C), precipitação (mm) e Evapotranspiração de referência – ET₀ (mm).

Resposta produtiva da interação entre sistemas de cultivos compostos por clones de palma forrageira e variedades de sorgo

A Figura 3 mostra, por meio de simulação realizada pelo modelo AquaCrop, a estimativa do calendário agrícola para os sistemas de cultivos exclusivos dos clones de palma forrageira (IPA, MIU e IPA) e das cultivares de sorgo (467, SF11 e P288), além da consorciação dessas culturas (IPA-SF11, MIU-P288 e OEM-SF11). Todos esses sistemas foram analisados sem irrigação e com irrigação para os municípios, estimando as datas de plantios mais adequadas para cada localidade com base no seu potencial produtivo ao final do ciclo.

De forma geral quando o cultivo é realizado em condições de sequeiro, ou seja, sem o uso da irrigação, evidenciou-se maiores riscos ao longo do ano, condicionando na redução do período de início do cultivo. Com isso, esse período do cultivo apresenta os menores riscos de perdas quando realizados no início do período chuvoso de cada município. No entanto, quando o sistema produtivo é realizado de forma irrigada, reduz-se os riscos de perdas na produção e amplia-se o período de início do cultivo, independente da exclusividade ou consorciação entre culturas (Figura 3).

O cultivo de forrageiras em condições irrigadas proporcionou aumento produtivo dos sistemas para todos municípios (Figura 3). Em média, considerando os cultivos da palma forrageira e sorgo, houve um aumento na produção de biomassa de aproximadamente 137% e 157%, para os sistemas exclusivos e consorciados, respectivamente. Vale destacar o município de Paulo Afonso, onde ocorreram os maiores aumentos proporcionais em virtude da irrigação, 332% e 439%, para as condições de cultivo simples e em consórcio, respectivamente.

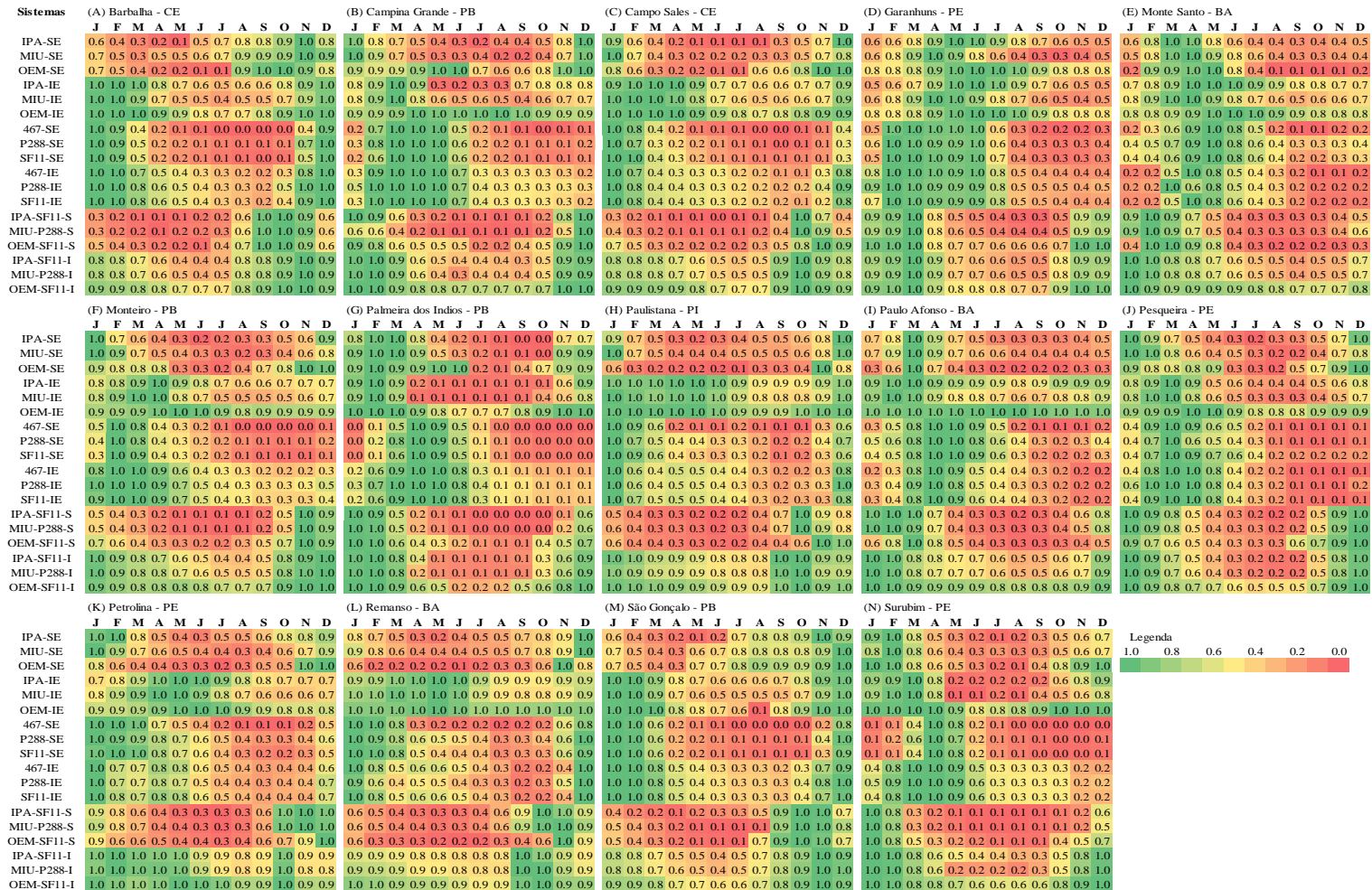


Figura 3. Simulação do calendário agrícola para os clones de palma forrageira (IPA, MIU, OEM) e sorgo (467, P288, SF11) cultivados de forma exclusivos (SE) e em consórcio, além das condições simuladas em sequeiro (S) e com uso da irrigação (I).

O clone de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana (OEM) cultivada de forma irrigada proporciona maiores retornos produtivos que os demais clones, além de possibilitar seu cultivo em praticamente qualquer período do ano, sem que haja expressivos riscos na produção.

O município de Garanhuns, por ser um local que apresenta menores temperaturas anuais (21,9 °C), possibilitou maiores períodos para início do plantio dessas culturas forrageiras. Todavia, quando a palma é cultivada de forma exclusiva, a faixa ideal para plantio é entre março e junho com riscos de perdas de aproximadamente 20% (Figura 3). Já o cultivo do sorgo, que tem ciclo reduzido (~100 dias), pode ser realizado entre fevereiro a junho com riscos de perdas inferiores a 10%.

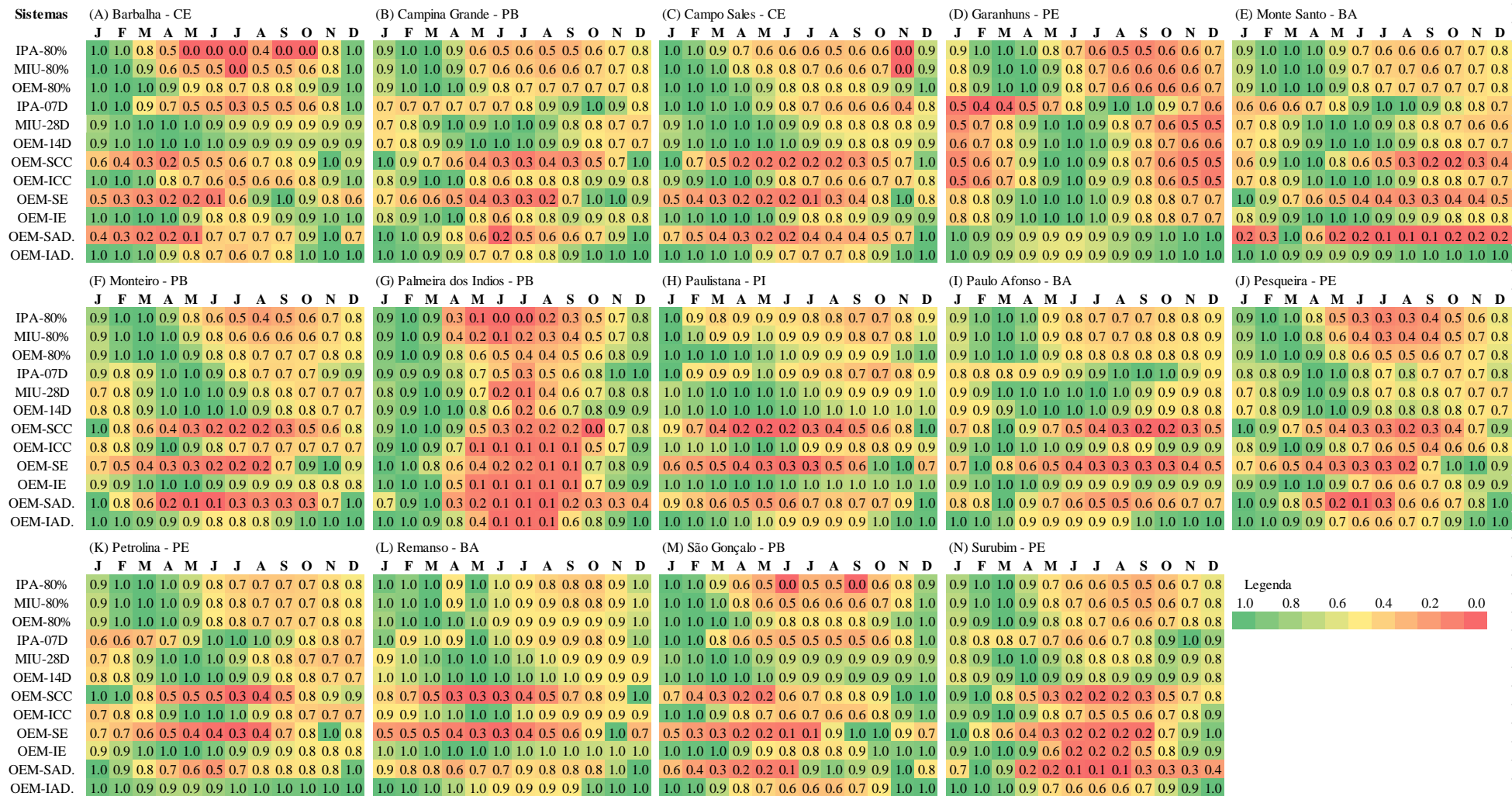
Quando o cultivo é realizado em consórcio entre os clones de palma e as cultivares de sorgo, verificou-se que o período com menores riscos (< 20%) de perdas produtivas ocorreu no período compreendido entre novembro e abril, desde que seja obedecido o intervalo de plantio da palma e posteriormente do sorgo, com quatro meses de diferença, respectivamente. Ao mesmo tempo que se verificou que com o somatório das biomassas dentro do consórcio elevou a produtividade a aproximadamente 70,6% e 63,7% acima dos cultivos individuais, em condições de sequeiro e irrigado, respectivamente.

No município de Petrolina é recomendado o cultivo da palma forrageira em condições de sequeiro no período compreendido entre dezembro e janeiro, antecedendo ao período chuvoso. Porém, quando o manejo é realizado de forma irrigada, possibilita maior faixa de tempo para início do cultivo (fevereiro a julho), com riscos inferiores a 10%.

O cultivo do sorgo no município de Petrolina deve ser realizado preferencialmente em janeiro, com riscos inferiores a 10%, podendo-se estender até abril com riscos de até 30% de perdas. Comportamento evidenciado para os sistemas de cultivo em condições de sequeiro e irrigado.

Efeitos de práticas agrícolas na produção de biomassa em sistemas forrageiros

Os efeitos condicionados pelas adoções de práticas agrícolas como a adição de cobertura morta, frequências de irrigações e adensamentos são evidenciados a partir das informações disponíveis na Figura 4.



De forma geral, quando o cultivo da palma forrageira é realizado entre dezembro e junho, com irrigação de 80% da ETc há uma tendência de melhores retornos produtivos e redução de perdas. Nessas condições, o clone IPA tem o menor período de plantio (janeiro a abril) e a OEM o maior (dezembro a junho), considerando riscos de perdas produtivas inferiores a 20%.

Considerando o exposto na Figura 4, constata-se que, em média, entre os clones com irrigações de 80% da ETc, a OEM apresentou as maiores produções de biomassa para todas as localidades, com produção 3,8 e 3,0 vezes maior em relação aos clones IPA e MIU, respectivamente.

O clone OEM também foi responsável por maiores resultados produtivos que os clones IPA e MIU para todas as localidades, quando submetidos a diferentes frequências de irrigações. Em média, a OEM com frequência de irrigação de 14 dias, proporcionou aumento de 137% em relação a IPA com frequência de irrigação de 7 dias, e de 75% em relação MIU irrigada a cada 28 dias.

O cultivo do clone de palma OEM com cobertura e em sistema sem irrigação proporcionou redução na produção de biomassa. No entanto, quando o sistema OEM com cobertura foi conduzido de forma irrigada, promoveu um aumento de aproximadamente 237% na produção de biomassa, em relação ao conduzido em sequeiro. Esse comportamento difere somente para o município de Garanhuns, onde as produções dos sistemas sem e com uso de irrigação, evidenciaram valores próximos, com elevação de apenas 6,0% para a condição irrigada (Figura 4).

Em praticamente todas as localidades que aplicaram a irrigação em paralelo ao uso de cobertura vegetal morta reduziram os riscos de perdas, e ampliaram os períodos ideais de plantios da palma forrageira.

Entre os sistemas avaliados, o adensamento do clone da palma forrageira OEM, em condições irrigadas, proporcionou aumento de aproximadamente 140% do constatado em nas mesmas condições, mas sem uso de irrigação. Essas informações de máxima biomassa são possíveis e condicionadas ao manejo adequado e ao início do ciclo de acordo com o calendário agrícola local. Com isso, é possível constatar que sistema OEM irrigado e adensado proporcionou aumentos produtivos e redução dos riscos de perdas para todas as localidades avaliadas com início do ciclo realizado entre os meses de dezembro e janeiro.

Discussão

Resposta produtiva do sistema palma-sorgo em consórcio e exclusivo

As culturas da palma forrageira e sorgo, quando cultivadas de forma consorciada, tendem a apresentar isoladamente produtividades menores em comparação aos seus cultivos exclusivos. No entanto, a partir do somatório das culturas em consórcio, verificou-se maior produtividade do sistema de cultivo em relação ao plantio individual. Este fato está diretamente relacionado a competição interespecífica entre essas culturas sob o sistema em consórcio por recursos disponíveis como água, nutrientes e luz (C. P. Alves et al., 2022; Amorim et al., 2017; Makino et al., 2019).

Jardim et al. (2021) ressaltam que a consorciação entre a palma forrageira e o sorgo em ambientes semiáridos pode elevar a eficiência no uso dos recursos naturais por meio da complementaridade interespecífica das culturas. Morugán-Coronado et al. (2020) ainda destacam que o consórcio proporciona alternativas no fornecimento de pastagem, contribuindo com a segurança alimentar e econômica diante a volatilidade do mercado.

Adaptabilidade e desempenho de clones de palma forrageira em ambiente semiárido

A partir da análise produtiva obtida pelos distintos sistemas de palma-sorgo, observa-se que, de forma geral, o clone de palma OEM tende a se destacar em relação aos demais independentemente do arranjo. Esse comportamento é atribuído as características intrínsecas do gênero *Opuntia stricta*, a qual necessita de menores demandas de nutrientes, além de ser mais tolerante as condições de déficit hídrico que os clones do gênero *Nopalea cochenillifera* (Inácio et al., 2020), sendo o gênero mais cultivado no mundo (Dubeux et al., 2021b). Estudos corroboram com as atribuições desse gênero, destacando a OEM com maior eficiência no uso da água e produção de biomassa que MIU e IPA (Araújo Júnior et al., 2021; Silva et al., 2015), maiores valores biométricos e menor suscetibilidade a mortalidade durante o ciclo (Jardim et al., 2021).

Sistemas de cultivos forrageiros em condições irrigadas

De acordo com as simulações os sistemas irrigados proporcionaram aumentos produtivos em relação aos conduzidos sem irrigação, constatados principalmente em localidades com temperaturas mais elevadas e regime pluviométrico reduzido. A irrigação proporciona a manutenção da disponibilidade e estabilidade hídrica do solo,

favorecendo a absorção pela planta, além da tendência da ampliação do período de cultivo e redução dos riscos de perdas (Campos et al., 2021; Nunes et al., 2021). Estudos realizados no semiárido brasileiro também mostraram a importância da irrigação e sua influência no aumento produtivo da palma e sorgo, cultivados de forma individual e em consórcio (Diniz et al., 2017; Jardim et al., 2021; Lima et al., 2018; Kumar et al., 2021).

Dantas et al., (2023) evidenciam a importância e adaptabilidade da palma forrageira para regiões com elevado déficit hídrico, porém ressaltam a necessidade da complementação hídrica para seu pleno desenvolvimento produtivo em locais com baixas altitudes, altas temperaturas e curta amplitude térmica. Com isso, essa necessidade hídrica complementar pode variar entre 2,5 e 7,5 mm por semana.

A partir do conhecimento da importância da irrigação para a complementação hídrica da palma forrageira, foi possível observar uma tendência de crescimento produtivo da palma forrageira com o aumento da lâmina de irrigação até aproximadamente 80% da ET_c, após isso a tendência é de estabilização do crescimento, ou seja, mesmo com posterior aumento da lâmina não há retorno produtivo significativo (Pereira et al., 2020; Queiroz et al., 2015).

Dubeux et al. (2021a) relata que os clones do gênero *Opuntia*, apesar de apresentarem menores concentrações de matéria seca e carboidratos solúveis que a *Nopalea*, necessitam de menores demandas de nutrientes e possuem maiores tolerâncias a secas, condicionando melhores respostas produtivas em condições semiáridas. Esse comportamento justifica a superioridade do clone OEM na produção de biomassa no semiárido brasileiro em relação aos demais clones.

Uso da cobertura morta em sistemas agrícola com pastagens

Analisando o efeito da cobertura morta na produção de biomassa, observou-se melhor desempenho do sistema quando manejado com cobertura. A adoção da cobertura morta no cultivo para a palma forrageira propiciou melhores condições na conservação de água no solo, reduzindo as perdas por evaporação e temperatura do solo e, por meio da decomposição vegetal, melhorando as propriedades físico-químicas do solo (Kader et al., 2017; Souza et al., 2021). Amorim et al. (2017) reforça que a cobertura morta favorece a emissão de novos cladódios. Com isso, possivelmente o município de Garanhuns não apresentou diferença na produção em condições irrigadas e sequeiro durante as simulações, em razão de temperaturas médias menores em relação as demais localidades.

Adensamento de plantas na intensificação do uso da terra com plantas forrageiras

O aumento da densidade de plantas proporcionou elevação na produção de biomassa para praticamente todas as localidades, sobretudo com irrigação. Demais estudos com diferentes adensamentos constataram o mesmo comportamento (Alves et al., 2022; Souza et al., 2017; Dubeux et al., 2021b). Portanto, é notável a importância do adensamento de plantas no aumento da produção de biomassa por unidade de área, aumentando a eficiência do uso da terra, além de reduzir os espaços de solos expostos e consecutivamente as perdas de água por evaporação.

Os genótipos de palma forrageira apresentam características que diferem nas características morfológicas dos cladódios, sendo influenciados diretamente pelas condições edafoclimáticas. Plantas com cladódios menores podem potencializar seu crescimento vertical, formando plantas com maiores alturas e menores larguras, como ocorre com o clone MIU. Fato que propicia o adensamento o aumento de plantas por adensamento. Por outro lado, plantas com cladódios maiores tendem no crescimento lateral, devido a sua forma estrutural, como o clone OEM (Edvan et al., 2020).

Produção agrícola em distintas condições ambientais

Existe uma relação direta entre a produção agrícola e as características climáticas, que ocasionam alterações no crescimento e desenvolvimento das culturas, dentre outros aspectos e processos fisiológicos como a eficiência do uso da água. Com isso, ocorrem modificações no ciclo vegetativo da cultura, reduzindo ou prolongando seu ciclo.

Em razão dessas distintas condições climáticas na produção agrícola, estratégias de adaptação e mitigação são fundamentais para proporcionarem condições favoráveis de cultivo. Para tanto, é necessário identificar as variáveis climáticas locais e considerar a influência dos fatores não climáticos que interferem na sensibilidade do cultivo as condições ambientais. Com isso, a importância na adoção de manejos agrônômicos e estratégias de mitigação, destacando ajustes nas datas de plantio em relação às perdas de rendimentos produtivos (Moradi et al., 2013).

Conclusões

O modelo AquaCrop foi capaz de simular diferentes sistemas de cultivos e manejos agrícolas com culturas forrageiras, indicando os sistemas e calendários agrícolas para

diferentes localidades no semiárido brasileiro. Com isso, o modelo mostrou-se uma ferramenta importante na estimativa da produção agrícola e tomadas de decisões.

O sistema de consócio palma-sorgo é uma excelente alternativa aumentando a oferta de forragem, além de otimizar o uso da terra, dos recursos naturais e proporcionar equilíbrio nutricional na qualidade da forragem.

Sistemas de cultivos em condições irrigadas tenderam a elevar o nível da produção de biomassa. Além disso, em condições irrigadas, reduziu os riscos de perdas em relação ao cultivo sem irrigação ampliando a faixa de cultivo.

O aumento da densidade no cultivo da palma e sorgo, em condições exclusivas e em consócio para a região do semiárido, favorece a otimização dos recursos naturais e eficiência no uso da terra.

Recomenda-se novos estudos com uso do modelo AquaCrop para diferentes culturas forrageiras e locais com diferentes condições climáticas e de solo, possibilitando melhorias no seu processo e, com isso, ampliar geograficamente sua faixa operacional. Paralelamente, são importantes estudos adicionais sobre os efeitos de pragas e doenças nas respostas produtivas das culturas e influências nas simulações do modelo AquaCrop, já que várias regiões são afetadas por esses fatores redutores.

Referências

- Adeboye, O. B., Schultz, B., Adeboye, A. P., Adekalu, K. O., Osunbitan, J. A. (2021). Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Information Processing in Agriculture*, 8(3), 419–436. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2020.10.002>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). *FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56*.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. Moaes. (2013). Modeling monthly mean air temperature for Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 113(3–4), 407–427. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0796-6>
- Alves, C. P., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Souza, L. S. B., Araújo, G. G. L., Souza, C. A. A., Salvador, K. R. S., Leite, R. M. C., Pinheiro, A. G., Silva, T. G. F. (2022). How to enhance the agronomic performance of cactus-sorghum intercropped system: planting configurations, density and orientation. *Industrial Crops and Products*, 184, 115059. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115059>
- Amorim, D. M., Silva, T. G. F., Pereira, P. C., Souza, L. S. B., Minuzzi, R. B. (2017).

- Phenophases and cutting time of forage cactus under irrigation and cropping systems. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 47(1), 62–71. <https://doi.org/10.1590/1983-40632016v4742746>
- Araújo Júnior, G. D. N., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Santos, J. P. A. S., Jardim, A. M. R. F., Alves, C. P., Alves, H. K. M. N. (2021). Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. *Bragantia*, 80, 1–12. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200390>
- Araújo Júnior, G. N., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B., Alves, C. P., Salvador, K. R. S., Souza, C. A. A., Montenegro, A. A. A., Silva, M. J. (2021). Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. *Journal of Arid Environments*, 190. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2021.104510>
- Araya, A., Kisekka, I., Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34(6), 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Bahmani, O., Eghbalian, S. (2018). Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model. *Agricultural Research*, 7(2), 158–166. <https://doi.org/10.1007/s40003-018-0311-0>
- Bell, L. W., Moore, A. D., Thomas, D. T. (2018). Integrating diverse forage sources reduces feed gaps on mixed crop-livestock farms. *Animal*, 12(9), 1967–1980. <https://doi.org/10.1017/S1751731117003196>
- Bello, Z. A., Walker, S. (2016). Calibration and validation of AquaCrop for pearl millet (*Pennisetum glaucum*). *Crop and Pasture Science*, 67(9), 948–960. <https://doi.org/10.1071/CP15226>
- Beza, E., Silva, J. V., Kooistra, L., Reidsma, P. (2017). Review of yield gap explaining factors and opportunities for alternative data collection approaches. *European Journal of Agronomy*, 82, 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.06.016>
- Camelo, D., Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F., Lira, M. A., Fracetto, G. G. M., Fracetto, F. J. C., Cunha, M. V., Freitas, E. V. (2021). Soil Microbial Activity and Biomass in Semiarid Agroforestry Systems Integrating Forage Cactus and Tree Legumes. *Agronomy 2021*, Vol. 11, Page 1558, 11(8), 1558. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11081558>
- Campos, A. R. F., Silva, A. J. P., Lier, Q. J., Nascimento, F. A. L., Fernandes, R. D. M., Almeida, J. N., Paz, V. P. S. (2021). Yield and morphology of forage cactus cultivars under drip irrigation management based on soil water matric potential thresholds. *Journal*

- of Arid Environments*, 193(January), 104564.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104564>
- Cooper, M., Mendes, L. M. S., Silva, W. L. C., Sparovek, G. (2005). A National Soil Profile Database for Brazil Available to International Scientists. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 649–652. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0140>
- Cunha, A. P. M., Alvalá, R. C., Nobre, C. A., Carvalho, M. A. (2015). Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, 494–505. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2015.09.010>
- Dantas, F. D. G., Santos, M. V. F., Lima, G. F. C., Coêlho, J. J., Medeiros, J. F., Cunha, M. V. (2023). Drip irrigation with saline water combined with mulch cover as strategies for forage cactus production in semi-arid zones. *Irrigation Science*, 41(2), 295–308. <https://doi.org/10.1007/S00271-022-00841-8/FIGURES/3>
- Dias, H. B., Sentelhas, P. C. (2018). Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of the Total Environment*, 637–638, 1127–1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>
- Dias-Martins, A. M., Pessanha, K. L. F., Pacheco, S., Rodrigues, J. A. S., Carvalho, C. W. P. (2018). Potential use of pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food security, processing, health benefits and nutritional products. *Food Research International*, 109, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.023>
- Diniz, W. J. S., Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. S., Santos, D. C., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724–733. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000900004>
- Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F., Cunha, M. V., Santos, D. C., Souza, R. T. A., Mello, A. C. L., Souza, T. C. (2021a). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275(February), 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
- Dubeux, J. C. B., Santos, M. V. F., Cunha, M. V., Santos, D. C., Souza, R. T. A., Mello, A. C. L., Souza, T. C. (2021b). Cactus (*Opuntia* and *Nopalea*) nutritive value: A review. *Animal Feed Science and Technology*, 275, 114890. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.114890>
- Edvan, R. L., Mota, R. R. M., Dias-Silva, T. P., Nascimento, R. R., Sousa, S. V., Silva, A. L., Araújo, M. J., Araújo, J. S. (2020). Resilience of cactus pear genotypes in a tropical semi-arid region subject to climatic cultivation restriction. *Scientific Reports*, 10(1), 10040. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66972-0>

- Farooq, N., Gheewala, S. H. (2020). Assessing the impact of climate change on sugarcane and adaptation actions in Pakistan. *Acta Geophysica*, 68(5), 1489–1503. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00463-8>
- Giménez, L., Paredes, P., Pereira, L. S. (2017). Water Use and Yield of Soybean under Various Irrigation Regimes and Severe Water Stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc Models. *Water* 2017, Vol. 9, Page 393, 9(6), 393. <https://doi.org/10.3390/W9060393>
- Guo, D. X., Chen, C. F., Guo, P. Y., Yuan, X. Y., Xing, X. G., Ma, X. Y. (2018). Evaluation of AquaCrop model for foxtail millet (*Setaria italica*) growth and water use with plastic film mulching and no mulching under different weather conditions. *Water (Switzerland)*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/w10070836>
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. *Water SA*, 43(2), 209. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i2.05>
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- Inácio, J. G., Conceição, M. G., Santos, D. C., Oliveira, J. C. V., Chagas, J. C. C., Moraes, G. S. O., Silva, E. T. S., Ferreira, M. A. (2020). Nutritional and performance viability of cactus *Opuntia*-based diets with different concentrate levels for Girolando lactating dairy cows. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 33(1), 35. <https://doi.org/10.5713/AJAS.18.0916>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Araújo Júnior, G. N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. S., Araújo, G. G. L., Moura, M. S. B. (2021). Intercropping forage cactus and sorghum in a semi-arid environment improves biological efficiency and competitive ability through interspecific complementarity. *Journal of Arid Environments*, 188(September 2020), 104464. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>
- Jardim, A. M. R. F., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Souza, M. S. (2020). Interaction of agroecosystem intercropped with forage cactus-sorghum in the semi-arid environment: a review. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(1), 69– <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2743.069-087>
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., Ito, K. (2017). Recent advances in mulching

- materials and methods for modifying soil environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155–166. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2017.01.001>
- Kumar, S., Louhaichi, M., Dana Ram, P., Tirumala, K. K., Ahmad, S., Rai, A. K., Sarker, A., Hassan, S., Liguori, G., Probir Kumar, G., Govindasamy, P., Prasad, M., Mahawer, S. K., Appaswamygowda, B. H. (2021). Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) Productivity, Proximal Composition and Soil Parameters as Affected by Planting Time and Agronomic Management in a Semi-Arid Region of India. *Agronomy* 2021, Vol. 11, Page 1647, 11(8), 1647. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11081647>
- Lima, L. R., Silva, T. G. F., Jardim, A. M. R. F., Souza, C. A. A., Queiroz, M. G., Tabosa, J. N. (2018). Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(2), 113–118. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V22N2P113-118>
- Lima, L. R., Silva, T. G. F., Pereira, P. D. C., Morais, J. E. F., Assis, M. C. D. S. (2018). Productive-economic benefit of forage cactus-sorghum intercropping systems irrigated with saline water. *Revista Caatinga*, 31(1), 191–201. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n122rc>
- Linker, R., Ioslovich, I., Sylaios, G., Plauborg, F., Battilani, A. (2016). Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. *Agricultural Water Management*, 163, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.011>
- Magalhães, I. D., Lyra, G. B., Souza, J. L., Teodoro, I., Rocha, A. E. Q., Cavalcante Júnior, C. A., Lyra, G. B., Ferreira Junior, R. A., Carvalho, A. L., Ferraz, R. L. S. (2019). Performance of the Aquacrop model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under irrigation condition. *Australian Journal of Crop Science*, 13(7), 1188–1196. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1790>
- Makino, P. A., Ceccon, G., Fachinelli, R. (2019). Produtividade e teor de nutrientes em populações de milho safrinha solteiro e consorciado com braquiária. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 18(2), 206–220. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v18n2p206-220>
- Monteiro, L. A., Allee, A. M., Campbell, E. E., Lynd, L. R., Soares, J. R., Jaiswal, D., Oliveira, J. C., Vianna, M. S., Morishige, A. E., Figueiredo, G. K. D. A., Lamparelli, R. A. C., Mueller, N. D., Gerber, J., Cortez, L. A. B., Sheehan, J. J. (2020). Assessment of yield gaps on global grazed-only permanent pasture using climate binning. *Global Change Biology*, 26(3), 1820–1832. <https://doi.org/10.1111/gcb.14925>
- Moradi, R., Koocheki, A., Mahallati, M. N., Mansoori, H. (2013). Adaptation strategies for

- maize cultivation under climate change in Iran: Irrigation and planting date management. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(2), 265–284. <https://doi.org/10.1007/S11027-012-9410-6/FIGURES/7>
- Moraes, G. S. O., Guim, A., Tabosa, J. N., Chagas, J. C. C., Almeida, M. P., Ferreira, M. A. (2019). Cactus [*Opuntia stricta* (Haw.) Haw] cladodes and corn silage: How do we maximize the performance of lactating dairy cows reared in semiarid regions? *Livestock Science*, 221, 133–138. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2019.01.026>
- Morugán-Coronado, A., Linares, C., Gómez-López, M. D., Faz, Á., Zornoza, R. (2020). The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. *Agricultural Systems*, 178(November 2019), 102736. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102736>
- Nunes, H. G. G. C., Farias, V. D. S., Sousa, D. P., Costa, D. L. P., Pinto, J. V. N., Moura, V. B., Teixeira, E. O., Lima, M. J. A., Ortega-Farias, S., Souza, P. J. O. P. (2021). Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. *Agricultural Water Management*, 252, 106880. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106880>
- Pereira, J. S., Cavalcante, A. B., Nogueira, G. H. M. S. M. F., Campos, F. S., Araújo, G. G. L., Simões, W. L., Voltolini, T. V. (2020). Morphological and yield responses of spineless cactus Orelha de Elefante Mexicana under different cutting intensities. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 21, 1–10. <https://doi.org/10.1590/s1519-99402121142020>
- Pessoa, D. V., Andrade, A. P., Magalhães, A. L. R., Teodoro, A. L., Santos, D. C., Araújo, G. G. L., Medeiros, A. N., Nascimento, D. B., Valença, R. L., Cardoso, D. B. (2020). Forage nutritional differences within the genus *Opuntia*. *Journal of Arid Environments*, 181(June), 104243. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104243>
- Pinheiro, A. G., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Araújo Júnior, G. N., Alves, C. P., Souza, C. A. A., Leite, R. M. C., Silva, T. G. F. (2021). Lacunas de produtividades e estratégias de cultivo na melhoria da produção de forragem para a região semiárida brasileira - Revisão. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(4), 2403–2426. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2403-2426>
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S., Lima, L. R., Alves, J. O. (2015). Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 931–938. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V19N10P931-938>
- Queiroz, M. G., Silva, T. G. F., Zolnier, S., Silva, S. M. S., Lima, L. R., Alves, J. O. (2015). Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes

- lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 931–938. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p931-938>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E. (2009). AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Razzaghi, F., Zhou, Z., Andersen, M. N., Plauborg, F. (2017). Simulation of potato yield in temperate condition by the AquaCrop model. *Agricultural Water Management*, 191, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.06.008>
- Sá Souza, M., Júnior, G. N. A., Souza, L. S. B., Jardim, A. M. R. F., Silva, G. I. N., Araújo, G. G. L., Campos, F. S., Leite, M. L. M. V., Tabosa, J. N., Silva, T. G. F. (2022). Forage yield, competition and economic benefit of intercropping cactus and millet with mulch in a semi-arid environment. <https://doi.org/10.2989/10220119.2021.2016967>.
- Saab, M. T. A., Albrizio, R., Nangia, V., Karam, F., Rouphael, Y. (2014). Developing scenarios to assess sunflower and soybean yield under different sowing dates and water regimes in the Bekaa valley (Lebanon): Simulations with Aquacrop. 8(October). <https://hdl.handle.net/20.500.11766/7314>
- Santos, R. D., Boote, K. J., Sollenberger, L. E., Neves, A. L. A., Pereira, L. G. R., Scherer, C. B., Gonçalves, L. C. (2017). Simulated Optimum Sowing Date for Forage Pearl Millet Cultivars in Multilocation Trials in Brazilian Semi-Arid Region. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02074>
- Sentelhas, P. C., Battisti, R., Câmara, G. M. S., Farias, J. R. B., Hampf, A. C., Nendel, C. (2015). The soybean yield gap in Brazil – magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *The Journal of Agricultural Science*, 153(08), 1394–1411. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- Silva, T. G. F., Araújo Primo, J. T., Morais, J. E. F., Diniz, W. J. S., Souza, C. A. A., Silva, M. C. (2015). Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no Semiárido e relações com variáveis meteorológicas. *Revista Caatinga*, 28(2), 10–18.
- Silva, T. G. F., Queiroz, M. G., Zolnier, S., Souza, L. S. B., Souza, C. A. A., Moura, M. S. B., Araújo, G. G. L., Steidle Neto, A. J., Santos, T. S., Melo, A. L., Cruz Neto, J. F., Silva, M. J., Alves, H. K. M. N. (2021). Soil properties and microclimate of two predominant landscapes in the Brazilian semiarid region: Comparison between a seasonally dry tropical forest and a deforested area. *Soil and Tillage Research*, 207, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104852>
- Souza, M. D. S., Silva, T. G. F., Souza, L. S. B., Alves, H. K. M. N., Leite, R. M. C., Souza, C. A. A., Araújo, G. G. L. D., Campos, F. S., Silva, M. J. D., Souza, P. J. D. O. P. (2021).

- Growth, phenology and harvesting time of cactus-millet intercropping system under biotic mulching. *68*(6), 764–778. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1852553>
- Souza, T. C., Santos, M. V. F., Dubeux Júnior, J. C. B., Lira, M. A., Santos, D. C., Cunha, M. V., Lima, L. E., Silva, R. R. (2017). Productivity and nutrient concentration in spineless cactus under different fertilizations and plant densities. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, *12*(4), 555–560. <https://doi.org/10.5039/agraria.v12i4a5473>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*, *101*(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J., Raes, D. (2015). A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: Evaluation of the AquaCrop procedure. *Journal of Agricultural Science*, *153*(7), 1218–1233. <https://doi.org/10.1017/S0021859614000872>
- Veloso, G. A., Ferreira, M. E., Ferreira Júnior, L. G., Silva, B. B. (2020). Modelling gross primary productivity in tropical savanna pasturelands for livestock intensification in Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *17*, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100288>
- Zhang, Z., Christensen, M., Nan, Z., Whish, J. P. M., Bell, L. W., Wang, J., Wang, Z., Sim, R. (2019). Plant development and solar radiation interception of four annual forage plants in response to sowing date in a semi-arid environment. *Industrial Crops and Products*, *131*(January), 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.028>
- Zhu, X., Xu, K., Liu, Y., Guo, R., Chen, L. (2021). Assessing the vulnerability and risk of maize to drought in China based on the AquaCrop model. *Agricultural Systems*, *189*(December 2020), 103040. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.103040>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A parametrização do modelo de simulação AquaCrop para culturas forrageiras sob diferentes arranjos produtivos na região semiárida brasileira permitiu prever a produção de biomassa em condições ambientais distintas para diferentes épocas do ano. Tal resultado deu suporte à elaboração de um calendário agrícola, que pode ser utilizado como ferramenta de apoio ao ZARC, e nas tomadas de decisão dos produtores da região.

Contudo, é importante destacar a necessidade de estudos posteriores com o intuito de analisar cenários futuros sob influência das mudanças climáticas, sobretudo os eventos de alterações pluviométricas e na concentração de CO₂ atmosférico que interfere na condutância estomática e na transpiração das plantas, impactando diretamente na produção e acúmulo de biomassa vegetal.

Cabe, então, aos pesquisadores dedicar atenção ao aprimoramento dos modelos buscando simular com precisão cenários futuros da produção agrícola. Para isso, a simulação das condições climáticas futuras, devem estar fundamentadas nas condições climáticas atuais, com ênfase nos aspectos limitantes que comprometem o rendimento das culturas.