

SIDNEY ANDERSON TEIXEIRA DA COSTA

**MODELO AQUACROP-FAO NA RECOMENDAÇÃO DE TÉCNICAS HÍDRICAS
PARA A PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

SERRA TALHADA-PE

2022

**C
O
S
T
A

S
A
T

M
O
D
E
L
O

A
Q
U
A
C
R
O
P

N
A

R
E
C
O
M
E
N
D
A
Ç
Ã
O
:
2
0
2
2**

SIDNEY ANDERSON TEIXEIRA DA COSTA

MODELO AQUACROP-FAO NA RECOMENDAÇÃO DE TÉCNICAS HÍDRICAS PARA
A PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte dos requisitos exigidos pelo Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Drº Thieres George Freire da Silva

Coorientadores: Prof. Drº Abelardo Antônio de A. Montenegro/ Prof. Drº Gherman Garcia Araújo

SERRA TALHADA-PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Sistema Integrado de Bibliotecas

C838m Costa, Sidney Anderson Teixeira da

Modelo Aquacrop-FAO na recomendação de técnicas hídricas para a produção de forragem no Semiárido brasileiro / Sidney Anderson Teixeira da Costa. – Serra Talhada: O autor, 2022.

128 f.: il.

Orientador: Thieres George Freire da Silva.

Coorientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro; Gherman Garcia Araújo

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, 2022.

1. Modelagem. 2. Planejamento agrícola. 3. Produção de forragem. 4. Resiliência agrícola I. Silva, Thieres George Freire da, orient. II. Montenegro, Abelardo Antnio de Assuncção; Araújo, Gherman Garcia, coorient. III. Título.

CDD 581.15

SIDNEY ANDERSON TEIXEIRA DA COSTA

**MODELO AQUACROP-FAO NA RECOMENDAÇÃO DE TÉCNICAS HÍDRICAS
PARA A PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal (Área de concentração: Agrometeorologia e Irrigação)

APROVADO em 30 de novembro de 2022.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Thieres George Freira da Silva (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada

Profa. Dra. Daniela de Carvalho Lopes
Universidade Federal de São João del-Rei
Examinador Externo

Drº. José Edson Florentino de Moraes
Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Examinador Externo

Prof^a. Dr.^a Luciana Sandra Bastos de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Examinador Externo

DEDICO...

A minha família, e em especial a minha mãe, Leoneide Godê, e ao meu pai, Sebastião Aldir Teixeira (*in memoriam*).

Sei que o meu trabalho é uma gota no oceano. Mas sem ele, o oceano seria menor". (Madre Tereza de Calcutá).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por se fazer presente na minha vida, a Ele devo todas as minhas superações e todos os preciosos ensinamentos das fases difíceis pelas quais passei. A Ele também agradeço por ter protegido cada um de nós que tivemos a oportunidade de superar esse período crítico de pandemia. A Deus peço a proteção a minha família e a de todos que tenham a oportunidade de ler esse material.

Aos meus pais, Sebastião Aldir Teixeira (in memorian) e Leoneide Godê da Costa, por todo esforço para me proporcionarem o melhor. Agradeço a eles por toda educação, incentivo, amor e sabedoria.

Agradecimento especial ao meu tio, Adriano Teixeira da Silva, ao qual tenho uma grande estima. Serei sempre grato pela força, acolhimento e tudo que fez por mim durante minha estadia em Serra Talhada. Em seu nome agradeço a sua esposa Ana Lúcia por todo o apoio, e aos meus primos-irmãos Arthur Vinicius, Ana Laura (*in memoriam*) e Maria Alice.

A minha companheira, Luzia Victória, pelo amor e paciência, pelo incentivo e orações dedicadas a mim nos momentos de lutas. Obrigado por sempre me ajudar nos momentos difíceis. Sou grato por estar sempre ao meu lado.

As minhas irmãs Luana, Lícia e Airla, e irmãos André, Edson e Erick por sempre torceram pelo meu sucesso.

Um agradecimento especial ao meu orientador Thieres George Freire da Silva, a quem admiro pela inteligência e determinação. O meu muito obrigado pela presteza, confiança, paciência e pelos ensinamentos ao longo dessa jornada acadêmica.

À Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de estudo durante o curso (IBPG-0473-5.01/20) e aos auxílios financeiros da própria FACEPE (APQ-1159-1.07/14, APQ-0300-5.03/17, APQ-0639-5.01/21), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (421003/2018-9, 309421/2018-7, 402622/2021-9, 309558/2021-2) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (2017/22269-2).

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PPGPV) pela oportunidade que me foi dada. Agradeço aos professores e aos colegas de turma do Programa pelos conhecimentos compartilhados. Agradeço aos demais colaboradores da UFRPE/UAST, que direta ou indiretamente contribuíram para atingir esse objetivo.

Um Agradecimento especial a todos que compõem o Grupo de Agrometeorologia no Semiárido (GAS), todos os momentos em campo foram de grande valia. Agradeço a todos que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho, em especial: Gebson, Cleber, Jandis, Kaique, George, Alexandre, Marcelo, João Pedro, Renan, Leonice, Gabriel, Carlos André.

A todos o meu muito obrigado.

Ainda que um exército me cercasse, o meu coração não temeria; ainda que a guerra se levantasse, contra mim, nele confiaria.

Porque no dia da adversidade me esconderá no seu pavilhão; no oculto do seu tabernáculo me esconderá; pôr-me-á sobre uma rocha.

Salmos 27:3;5

Costa, Sidney Anderson Teixeira da. **Modelo AquaCrop-FAO na Recomendação de Técnicas Hídricas para a Produção de Forragem no Semiárido Brasileiro**. 2022. 128f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, Pernambuco, Brasil.

RESUMO GERAL

A modelagem para simulação de rendimentos de cultivos agrícolas é uma alternativa para auxiliar no estudo e na recomendação das melhores técnicas hídricas, isto é, práticas de eficiência do uso da água na agricultura. Ademais, avaliar as melhores estratégias para a produção de forragem em regiões de clima semiárido é de grande relevância, considerando as características ambientais e a vulnerabilidade social dessas áreas. Objetivou-se com esta pesquisa aplicar o modelo AquaCrop-FAO para diferentes sistemas produtivos de plantas forrageiras, tendo como cultura principal a palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana (OEM) — *Opuntia stricta* (Haw.). Para isso, o modelo foi calibrado e avaliado para cinco sistemas de produção de forragem nas condições edafoclimáticas de Serra Talhada-PE, durante o período de julho de 2018 a agosto de 2020. Os sistemas consistiram em diferentes experimentos envolvendo arranjos (densidades de plantio) de cultivo OEM em consórcio com o sorgo (*Sorghum bicolor*), cultivar IPA-467; OEM sob aplicação de cobertura morta no solo e sob adubação com ureia. Parâmetros de clima, cultura, solo e manejo foram coletados dos experimentos para a calibração e validação do AquaCrop. A análise estatística da parametrização do modelo foi realizada mediante os indicadores estatísticos raiz relativa do erro quadrado médio normalizado (RMSE) e RMSE normalizado (NRMSE); coeficiente de determinação (R^2); Coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EM); e Índice de concordância de Willmot (d). Após validação do modelo aplicou-se para simulação da produtividade em diferentes épocas de plantio/implementação dos sistemas de produção de forragem para manejo irrigado e em sequeiro nas condições de solo e clima de outros sete municípios inseridos no semiárido do Brasil. Os dados de granulometria do solo que serviram para elaboração dos arquivos de solo para esses municípios foram obtidos por meio da plataforma PronaSolos (Programa Nacional de Solos do Brasil), enquanto os dados de clima, do Instituto Nacional de Meteorologia. Além disso, utilizou-se o software SPAW, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), para estimar parâmetros físico-hídricos dos solos dos municípios estudados. Os parâmetros estatísticos obtidos na parametrização do modelo apontaram seu bom desempenho para estimar a biomassa seca, com $10 < \text{NRMSE} < 20$; $R^2 > 0,96$ e $\text{EM} > 0,95$ para a maioria dos tratamentos. Descobriu-se que os sistemas consorciados mais adensados ($0,10 \times 1,25$ m e $0,10$ m $\times$ $1,00$ m) foram os mais produtivos em condições irrigadas para todos os municípios simulados. Em síntese, conforme as simulações, o plantio entre os meses de novembro e dezembro se mostrou a melhor época de plantio/implementação dos sistemas sob condições irrigadas, isso porque se confunde com início do período chuvoso para a maioria dos municípios, exceto para localidades como Garanhuns-PE, Arcoverde-PE e Surubim-PE, que apresentam menor irregularidade na distribuição anual das chuvas em comparação com os demais municípios estudados. Nas condições de sequeiro, o uso da cobertura morta no solo se mostrou como uma maneira paliativa para manter bons níveis de produtividade para a palma na maioria dos pontos estudados ao longo do ano, em que pese não substitua a irrigação.

Palavras-chave: Modelagem, planejamento agrícola, produção de forragem, resiliência agrícola.

Costa, Sidney Anderson Teixeira da. **Aquacrop-FAO model in recommending water technologies for forage production in the Brazilian semiarid region**. 2022. 128f. Dissertation (Master's in Plant Production) - Federal Rural University of Pernambuco/Academic Unit of Serra Talhada, Serra Talhada, Pernambuco, Brazil.

ABSTRACT

The modeling of crop yield simulation is an alternative to assist in the study and recommendation of the best water techniques, that is, practices of water use efficiency in agriculture. Ademais, avaliar as melhores estratégias para a produção de forragem em regiões de clima semárido é de grande relevância, considerando as características ambientais e a vulnerabilidade social dessas áreas. The aim of this research was to apply the AquaCrop-FAO model to different forage plant production systems, with the Mexican Elephant's Ear (OEM) - *Opuntia stricta* (Haw.) forage palm as the main crop. For this, the model was calibrated and evaluated for five forage production systems in the edaphoclimatic conditions of Serra Talhada-PE, during the period from July 2018 to August 2020. The systems consisted of different experiments involving arrangements (planting densities) of OEM crop in consortium with sorghum (*Sorghum bicolor*), cultivar IPA-467; OEM under application of soil mulch and under urea fertilization. Parameters of climate, culture, soil and management were collected from the experiments for the calibration and validation of AquaCrop. The statistical analysis of the model parameterization was performed using the statistical indicators relative root mean square normalized error (RMSE) and normalized RMSE (NRMSE); coefficient of determination (R^2); Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (MS); and Willmot's agreement index (d). After validation of the model it was applied to simulate the productivity in different seasons of planting/implementation of forage production systems for irrigated and rainfed management in soil and climate conditions of other seven municipalities inserted in the semi-arid region of Brazil. The soil granulometry data that served to elaborate the soil files for these municipalities were obtained through the PronaSolos platform (Brazilian National Soil Programme), while the climate data, from the National Meteorology Institute. Furthermore, the SPAW software, from the United States Department of Agriculture (USDA), was used to estimate physical-hydric parameters of the soils of the studied municipalities. The statistical parameters obtained in the parameterization of the model pointed out its good performance to estimate dry biomass, with $10 < \text{NRMSE} < 20$; $R^2 > 0.96$ and $\text{MS} > 0.95$ for most treatments. It was found that the most densely packed intercropping systems (0.10×1.25 m and 0.10 m $\times$ 1.00 m) were found to be the most productive under irrigated conditions for all simulated counties. In summary, according to the simulations, planting between the months of November and December showed to be the best time for planting/implementation of the systems under irrigated conditions, because it coincides with the beginning of the rainy season for the majority of the municipalities, except for locations like Garanhuns-PE, Arcoverde-PE and Surubim-PE, which present less irregularity in the annual rainfall distribution in comparison with the other municipalities studied. In dryland conditions, the use of soil mulching proved to be a palliative way to maintain good levels of palm productivity in most of the locations studied throughout the year, although it does not replace irrigation.

Keywords: Modelling, agricultural planning, fodder production, agricultural resilience.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	18
CAPÍTULO I	19
TÉCNICAS HIDRICAMENTE EFICIENTES E MODELAGEM MATEMÁTICA: ESTRATÉGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE E INTENSIFICAÇÃO DA AGRICULTURA FRENTE ÀS MUDANÇAS DO CLIMA EM AMBIENTES SUSCETÍVEIS À DESERTIFICAÇÃO.....	19
RESUMO.....	20
1. INTRODUÇÃO	22
2. REVISÃO DE LITERATURA	23
2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA DESERTIFICAÇÃO E OS SEUS EFEITOS NAS ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS.....	24
2.2 AGRICULTURA VERDE: INTENSIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL E IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA.....	26
2.3 TÉCNICAS HÍDRICAS RECOMENDADAS PARA REGIÕES COM BAIXA DISPONIBILIDADE HÍDRICA	29
2.4 INDICADORES AMBIENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO	33
2.5 A MODELAGEM PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	35
2.6 MODELO AQUACROP	37
2.7 MUDANÇAS CLIMÁTICAS: CENÁRIOS FUTUROS E SEUS EFEITOS NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	39
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CAPÍTULO II.....	52
CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO AQUACROP-FAO PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO DO BRASIL	53
RESUMO.....	53
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	57
2.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL.....	57
2.2 ARRANJO EXPERIMENTAL E PRÁTICAS CULTURAIS	59
2.2.1 Experimento 1 — palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,00m entre fileiras	60
2.2.2 Experimento 2 — palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,25m entre fileiras	60

2.2.3	Experimento 3 — palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo e consorciada com sorgo	60
2.2.4	Experimento 4 — palma forrageira sob níveis de cobertura morta.....	61
2.2.5	Experimento 5 — palma forrageira submetida a adubação com ureia.....	61
2.3	MODELO AQUACROP E SEUS PARÂMETROS DE ENTRADA.....	61
2.3.1	Parâmetros de clima.....	62
2.3.2	Parâmetros de cultura	63
2.3.3	Parâmetros do solo	64
2.3.4	Parâmetros de manejo.....	64
2.4	OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PRODUTIVOS E DE DESENVOLVIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA	65
2.5	CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO AQUACROP E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	66
2.5.1	Raiz relativa do erro quadrado médio normalizado (RMSE) e Erro quadrado médio da raiz normalizado (RMSE).....	66
2.5.2	Coeficiente de determinação (R^2).....	67
2.5.3	Coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EM)	67
2.5.4	Índice de concordância de Willmot (d)	68
3.	RESULTADOS.....	68
3.1.1	Sistema de produção: palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,00 m entre fileiras	69
3.1.2	Sistema de produção: palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,25m entre fileiras	73
3.1.3	Sistema de produção: palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo e consorciada com sorgo	77
3.1.4	Sistema de produção: palma forrageira sob níveis de cobertura morta.....	80
3.1.5	Sistema de produção: palma forrageira submetida a adubação com ureia	83
4.	DISCUSSÃO.....	86
4.1	O MODELO AQUACROP NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA SISTEMAS DE CONSÓRCIO PALMA-SORGO	86
4.2	O MODELO AQUACROP NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA FORRAGEIRA PALMA FORRAGEIRA SOB COBERTURA MORTA E SOB ADUBAÇÃO COM UREIA	88
5.	CONCLUSÕES	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	CAPÍTULO III	94
	O AQUACROP NA SIMULAÇÃO DO CALENDÁRIO AGRÍCOLA PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	95

RESUMO	95
1. INTRODUÇÃO	97
2. MATERIAL E MÉTODOS	99
2.1 LOCAIS DE ESTUDO E DADOS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO	99
2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	99
2.3 MODELO AQUACROP E SEUS PARÂMETROS DE ENTRADA	101
2.3.1 Parâmetros de clima	101
2.3.2 Parâmetros de solo	103
2.3.3 Parâmetros de cultura	104
2.3.4 Parâmetro de Manejo	106
2.4 SIMULAÇÃO DE ÉPOCAS DE PLANTIO	106
3. RESULTADOS	106
3.1 SIMULAÇÃO DA ÉPOCA DE PLANTIO/CORTE DA PALMA FORRAGEIRA PARA MUNICÍPIOS INSERIDOS NO SEMIÁRIDO	106
3.1.1 Serra Talhada-PE	106
3.1.2 Arcoverde-PE	108
3.1.3 Petrolina-PE	110
3.1.4 Monteiro-PB	112
3.1.5 Surubim-PE	114
3.1.6 Garanhuns-PE	116
3.1.7 Petrolândia-PE	118
3.1.8 Paulistana-PI	120
4. DISCUSSÃO	122
5. CONCLUSÃO	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1. Mapa Global da Vulnerabilidade à Desertificação.....	25
Figura 2. Características dos agroecossistemas quanto ao nível de resiliência.....	28
Figura 3. Fluxograma do AquaCrop evidenciando os principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera e os parâmetros de fenologia, cobertura do dossel, transpiração, biomassa e rendimento final.....	38

CAPÍTULO II

Figura 1. Localização do município de Serra Talhada e a vista dos experimentos conduzidos no Centro de Referência Internacional de Estudos em Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras.....	57
Figura 2. Condições meteorológicas médias (2011 – 2020) do município de Serra Talhada-PE.....	58
Figura 3. Variações diárias da precipitação, das temperaturas máximas e mínimas, e da evapotranspiração de referência (ET _o) durante o período de condução de experimentos com palma forrageira em Serra Talhada, Pernambuco.	63
Figura 4. Produtividade e cobertura do dossel observadas e simuladas e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para diferentes espaçamentos de plantio para o consórcio palma-sorgo.....	71
Figura 5. Produtividade e cobertura do dossel (CC) observadas e simuladas, com o AquaCrop, e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para a palma forrageira conduzida sob espaçamentos entre plantas e em consórcio com o sorgo.....	75
Figura 6. Produtividade (Y) e cobertura do dossel (CC) observadas e simuladas para o consórcio palma-sorgo, com o AquaCrop, e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para ambas as culturas.....	79
Figura 7. Produtividade (Y) e cobertura do dossel (CC) simuladas com o AquaCrop e observadas e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para a palma forrageira.....	82
Figura 8. Produtividade e cobertura do dossel (CC) observadas e simuladas, com o AquaCrop, e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para a palma forrageira submetida a adubação com ureia.....	85

CAPÍTULO III

Figura 1. Localização dos municípios inseridos no semiárido para os quais foram feitas simulações de sistemas de produção de forragem com o modelo AquaCrop.	99
Figura 2. Distribuição das médias históricas diárias das variáveis meteorológicas temperaturas máxima e mínima (°C), precipitação (mm) e evapotranspiração de referência – ET _o (mm) para os municípios estudados.	102
Figura 3. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Serra Talhada-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.	107
Figura 4. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Serra Talhada-PE.	108
Figura 5. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Arcoverde-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.....	109
Figura 6. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Arcoverde-PE.	110

Figura 7. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Petrolina-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.....	111
Figura 8. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Petrolina-PE.	112
Figura 9. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Monteiro-PB. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.	113
Figura 10. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Monteiro-PB.	114
Figura 11. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Surubim-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.....	115
Figura 12. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Surubim-PE.	116
Figura 13. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Garanhuns-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.....	117
Figura 14. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Garanhuns-PE.	118
Figura 15. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Petrolândia-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.....	119
Figura 16. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação para o município de Petrolândia-PE.....	120
Figura 17. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Paulistana-PI. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.....	121
Figura 18. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Paulistana-PI.....	122

LISTA DE TABELAS

CAPITULO II

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo coletado na área experimental da UFRPE/Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), experimentos com palma forrageira.	58
Tabela 2. Parâmetros calibrados no AquaCrop.	63
Tabela 3. Parâmetros de entrada no modelo AquaCrop no compartimento de solo para o processo de calibração do modelo para sistemas de produção de forragem.	64
Tabela 4. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira sob diferentes espaçamentos de cultivo em consórcio com sorgo.....	69
Tabela 5. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura do sorgo forrageiro em consórcio com a palma forrageira conduzida sob diferentes espaçamentos de plantio.....	70
Tabela 6. Parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade (Ys) (MS,ton/ha) para a palma forrageira (A) conduzida sob espaçamentos entre plantas e em consórcio com o sorgo (B).	72
Tabela 7. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira em consórcio com o sorgo e conduzida sob diferentes espaçamentos entre plantas.....	73
Tabela 8. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura do sorgo forrageiro em consórcio com a palma forrageira conduzida sob diferentes espaçamentos de plantio e espaçamento fixo de 1,25m entre linhas.	74
Tabela 9. Parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade (Ys) (MS,ton/ha) para a palma forrageira (A) conduzida sob espaçamentos entre plantas e em consórcio com o sorgo (B).	76
Tabela 10. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo em consórcio com sorgo (IPA-2502).	77
Tabela 11. Parâmetros calibrados no AquaCrop para o sorgo conduzido em consórcio com a palma forrageira OEM sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo.	78
Tabela 12. Parâmetros estatísticos obtidos na avaliação do modelo Aquacrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade da palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre fileiras de cultivo em consórcio com o sorgo.....	80
Tabela 13. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira sob cobertura morta do solo.	81
Tabela 14. Parâmetros estatísticos obtidos na avaliação do modelo Aquacrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade da palma forrageira sob cobertura morta.	83
Tabela 15. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira submetida a adubação com ureia.....	84
Tabela 16. Parâmetros estatísticos obtidos na avaliação do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade (Ys) (MS,ton/ha) para a palma forrageira submetida a doses de ureia.	86

CAPÍTULO III

Tabela 1. Condições e arranjos agrícolas, aplicados nas simulações de produção de biomassa para as distintas localidades da região semiárida do Brasil.....	100
Tabela 2. Precipitação média acumulada anual, temperaturas máxima e mínima média, e evapotranspiração de referência para os municípios estudados.....	103
Tabela 3. Informações de entrada de solo no modelo AquaCrop para os municípios em que foi aplicado o AquaCrop.....	103
Tabela 4. Parâmetros utilizados no AquaCrop para simulação da produtividade dos diferentes sistemas produção palma-sorgo.	104
Tabela 5. Parâmetros utilizados no AquaCrop para simulação da produtividade dos diferentes sistemas produção para palma forrageira.....	105

1. INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro é caracterizado pelas suas peculiaridades climáticas e ambientais, como irregularidade espaço-temporal das chuvas, demanda atmosférica superior a precipitação, presença de áreas com riscos de desertificação (Santos e Aquino, 2017; Tinôco et al., 2018; Costa et al., 2021). Atrelado a isso, geralmente a produção de forragem é conduzida sob ineficientes práticas de manejos que acarretam diretamente em baixos rendimentos, e favorece o agravamento de problemas ambientais como salinização e erosão do solo. Na busca otimizar a utilização dos recursos naturais (especialmente a água) e melhorar o nível de produtividade das culturas forrageiras, é indispensável a adoção de medidas que visem a melhoria da resiliência agrícola, de modo a diminuir a irregularidade da produção de forragem na região (Araújo Júnior et al., 2021; Dias-Martins et al., 2018).

Nesse contexto, as técnicas hidricamente eficientes são práticas que possibilitam a conservação dos recursos hídricos e que favorecem a potencialização sustentável do uso da água aplicada nos cultivos e consequentemente favorecer a produção de forragem em áreas onde o déficit hídrico ocorre regularmente, como as regiões de clima semiárido (Kannan e Anandhi, 2020). Entre as principais técnicas hídricas recomendadas para essas regiões pode-se citar: a adoção de espécies resistentes ao estresse hídrico, o uso de cobertura morta no solo, o uso de irrigação eficiente, consórcio entre culturas, aumento da densidade de plantios, adubação eficiente (Queiroz et al., 2016; Wang et al., 2016; Tuğrul et al., 2020). Somado-se a isso, a simulação por meio da modelagem permite inferir sobre as respostas dos sistemas de produção de forragem sob distintos manejos de técnicas hidricamente eficientes, de modo a inferir sobre as melhores estratégias de adaptação.

No âmbito da modelagem agrícola, um dos modelos mais estudados é o AquaCrop, desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO). O modelo simula o rendimento de culturas agrícolas adotando a água como um fator limitante. O AquaCrop já foi bastante aplicado para forrageiras diversas, como sorgo forrageiro (Hadebe et al., 2017; Starr et al., 2020) e milheto (Bello e Walker, 2016). Todavia, não há, até então, publicações de artigos nos quais se buscou calibrá-lo, validá-lo e aplicá-lo para a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.)].

Portanto, lançando-se mão da modelagem matemática, por meio dos modelos de simulação de culturas, é possível explorar os mais diversos contextos ambientais e inferir sobre as respostas das culturas agrícolas às variáveis agrometeorológicas e às práticas de manejo, de modo a fomentar o planejamento agrícola e as tomadas de decisões do setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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>
- Bello, Z. A., e 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>
- Chitsiko, R. J., Mutanga, O., Dube, T., Kutwayo, 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>
- Costa, S. A. T., Bezerra, A. C., Araújo, A. M., Q., Silva, M. F., Cruz Neto, J. F., Alves, R. M A., e Souza, L. S. B. (2021). Dinâmica espaço-temporal das anomalias de precipitação em uma região semiárida, Nordeste do Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 18(1), 14–0. <https://doi.org/10.21168/reg.v18e14>
- 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>
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., e Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. *Water SA*, 43(2), 209–221. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i2.05>
- Kannan, N.; Anandhi, A. (2020). Water Management for Sustainable Food Production. *Water*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030778>
- Queiroz, M. G.; Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S.; Souza, C. A. A.; Carvalho, H. F. S. 2016. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. *Irriga*, 1(1), 141-154. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- Santos, F. D. A., e Aquino, C. M. S. (2017). Panorama da Desertificação no Nordeste do Brasil: características e suscetibilidades. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, 2(7), 144. <https://doi.org/10.18764/2446-6549.v2n7p144-161>
- Starr, M., Deng, B., e Helenius, J. (2020). Aquacrop-simulated response of sorghum biomass and grain yield to biochar amendment in South Sudan. *Agronomy*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy10010067>
- Tinôco, I. C. M., Bezerra, B. G., Lucio, P. S., e Barbosa, L. de M. (2018). Characterization of rainfall patterns in the semiarid Brazil. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 41(2), 397–409. https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409
- Tuğrul, M. K. 2020. Soil Management in Sustainable Agriculture. *Sustainable Crop Production*, 105772. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88319>
- Wang, Q.; Huo, Z.; Zhang, L.; Wang, J.; Zhao, Y. 2016. Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China. *Agricultural Water Management*, 163, 125-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.012>

CAPÍTULO I

**TÉCNICAS HIDRICAMENTE EFICIENTES E MODELAGEM MATEMÁTICA:
ESTRATÉGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE E INTENSIFICAÇÃO DA
AGRICULTURA FRENTE ÀS MUDANÇAS DO CLIMA EM AMBIENTES
SUSCETÍVEIS À DESERTIFICAÇÃO**

TÉCNICAS HIDRICAMENTE EFICIENTES E MODELAGEM: ESTRATÉGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE E INTENSIFICAÇÃO DA AGRICULTURA FRENTE ÀS MUDANÇAS DO CLIMA EM AMBIENTES SUSCETÍVEIS À DESERTIFICAÇÃO

RESUMO

A desertificação é um processo dinâmico e complexo que ocorre principalmente nas regiões áridas e semiáridas; pode ocorrer de forma natural ou por intermédio de ações antrópicas. Não obstante, este processo tenderá a ser mais suscetível em cenários de mudanças climáticas. De encontro a isso, objetivou-se fazer uma abordagem acerca das principais estratégias que podem contribuir para a sustentabilidade, intensificação e planejamento da atividade agrícola, em especial no contexto da produção de forragem nas regiões com riscos de desertificação. Para isso, discutiu-se os problemas e as principais características ambientais das áreas suscetíveis a esse processo; abordou-se o uso de técnicas hídricas (adoção de espécies vegetais resistentes ao estresse hídrico, uso de clones/cultivares mais adaptados à condições estressantes, intensidade de corte, cultivo, uso de cobertura morta), práticas que visam aumentar a eficiência do uso da água na agricultura; destacou-se o modelo AquaCrop da FAO como ferramenta para inferir sobre o impacto de possíveis cenários ambientais na agricultura, bem como simular as melhores estratégias de resiliência; e, por fim, frisou-se outros conceitos relacionados a sustentabilidade da agricultura como: eficiência no uso da água, agricultura verde, e caracterizadores de um sistema agrícola. Diante disso, considerando as características ambientais das regiões suscetíveis à desertificação, as técnicas hídricas podem servir como ferramentas para mitigar os impactos ambientais, aumentar a eficiência no uso da água e garantir uma menor sazonalidade da produção agrícola nessas áreas. Ainda, deve-se adotar uma visão holística dos agroecossistemas para integrar as técnicas hídricas a outras estratégias de aumento da eficiência no uso dos recursos e de redução na liberação de gases de efeito estufa (GEE), de modo a contribuir com a sustentabilidade da atividade e a mitigação dos impactos no meio ambiente. Outrossim, com a utilização da modelagem é possível prever os impactos que as condições climáticas futura proporcionarão ao planeta, de modo a planejar estratégias mais eficazes para a convivência da agricultura com as condições ambientais mais adversas oriundas das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Semiárido, Aquacrop; eficiência no uso da água; resiliência agrícola

WATER TECHNOLOGIES AND MODELING: STRATEGIES IN THE SEARCH FOR SUSTAINABILITY AND INTENSIFICATION OF AGRICULTURE IN ENVIRONMENTS SUSCEPTIBLE TO DESERTIFICATION

ABSTRACT

Desertification is a parallel and complex process that occurs mainly in arid and semi-arid regions; can occur naturally or through human actions. However, this process will tend to be more susceptible to climate scenarios. Against this, the objective is to make an approach on the main strategies that can contribute to the sustainability, intensification and planning of agricultural activity, especially in the context of forage production in regions with risk of desertification. For this, separate the problems and the main characteristics of the areas discussed in this process; addressed the use of water technologies (adoption of plant species resistant to water, use of clones/cultivars more adapted to stressful conditions, cutting intensity, cultivation, use of mulch), practices that aim to increase the efficiency of the use of stress water in agriculture; FAO's Aquacrop model was highlighted as a tool to assess the impact of better environmental scenarios in agriculture, as well as to simulate resilience strategies; and, finally, other concepts related to the sustainability of agriculture were highlighted, such as: efficiency in the use of water, green agriculture, and characteristics of an agricultural system. Considering how environmental resources increase capacity areas to guarantee desertification, tools can serve as tools for water use and increase the need for smaller production areas. Also, adopt a holistic view of agroecosystems to integrate as technologies and resources to other strategies to increase sustainability and reduce the release of greenhouse gases (GHG), in order to contribute to the activity of the activity and the mitigation of impacts on the environment. Predict the impacts of modeling as predictable conditions for the planet, in order to use planning according to the most adverse environmental conditions or arising from adverse environmental conditions.

Keywords: Semiarid, Aquacrop; efficiency in water use; agricultural resilience.

1. INTRODUÇÃO

A desertificação é um processo complexo que ocorre por meio da dinâmica entre muitos fatores, sejam eles ambientais ou antrópicos (Adamo e Crews-Meyer, 2006). Esse fenômeno ocorre em diversas partes do mundo e pode resultar em perda irreversível do potencial produtivo da terra (Wijitkosum, 2016). Ademais, as alterações causadas pela desertificação podem ser vistas pela deterioração da vegetação, erosão e salinização, além da redução da biota e da fertilidade do solo, da compactação e crostas no solo (Dregne, 1986; Verstraete e Schwartz, 1991).

Diversas estratégias, como as técnicas hídricas, podem ser empregadas para minimizar o problema da desertificação, bem como para se obter melhores rendimentos e viabilidade econômica da atividade agrícola nas áreas impactadas com esse processo. Atrelado a isso, com uso de modelagem é possível fazer a simulação dessas tecnologias para outras condições ambientais e em cenários climáticos futuros.

As técnicas hídricas nada mais são que práticas que possibilitam a conservação dos recursos hídricos e que favorecem a potencialização sustentável do uso das águas aplicada nos sistemas de produção (Sun et al., 2016; Liu e Basso, 2020). São exemplos de técnicas hídricas: cultivo sob condição deficitária de água no solo em pequenas áreas; adoção de espécies sazonalmente ou persistentemente resistentes ao estresse hídrico; uso de clones/cultivares mais adaptados a um determinado ambiente; intensidade de corte; cultivo adensado para melhoria da utilização por unidade de área hidricamente irrigada; uso de cobertura morta para melhorias térmico-hídricas e nutricionais do cultivo; consorciação entre culturas em sistema de plantio intensivo, entre outras (Stefanoski et al., 2013; Queiroz et al., 2016; Wang et al., 2016; Diniz et al., 2017; Wang et al., 2019).

Melhorias na produtividade das culturas em cenários de disponibilidade hídrica limitada, de variações de temperaturas e características dos solos, são vitais para atender a demanda global por alimentos (Balyan et al., 2017). Essa problemática vem sendo muito discutida em diversas partes do mundo para, justamente, compreender os possíveis efeitos das alterações climáticas na produção agrícola (Pareek et al., 2020). Nesse aspecto, o uso da modelagem é uma importante ferramenta que possibilita estimar a produção agrícola em possíveis cenários de mudanças ambientais envolvendo clima e solo, bem como explorar diferentes estratégias de adaptação a fim de fazer recomendações (Boote et al., 2013).

Quando se fala na utilização de modelos para estimativa da produção agrícola em diferentes cenários climáticos e ambientais, o modelo AquaCrop, desenvolvido pela FAO em

2011, é um dos mais adotados desde que foi lançado. Ele propõe uma modelagem de culturas agrícolas com simulação de crescimento e produtividade em função da cobertura do dossel (Akumaga et al., 2018; Bouras et al., 2019; Akinseyea et al., 2020; Rosa et al., 2020). Apesar de ser muito utilizado, estudos avaliando o seu desempenho para as condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro ainda são escassos, em especial na parametrização para espécies como *Opuntia stricta* (Haw) e *Sorghum bicolor* (L.), espécies forrageiras recomendadas para essa região.

É notório que a disponibilidade hídrica é um dos principais gargalos para o avanço da produção de forragem em diversas partes do mundo. Em muitos países em desenvolvimento, a crescente demanda por irrigação e a redução da disponibilidade de água para este fim, bem como o crescimento populacional estão pressionando cada vez mais os recursos hídricos (Liu et al., 2017). Daí a importância de se analisar e difundir estratégias que visem o uso sustentável da água.

Para manter o uso sustentável da água no setor agropecuário e garantir a segurança alimentar, técnicas para melhorias na eficiência do uso da água tornam-se indispensáveis (Fishman et al., 2015; Akinseyea et al., 2020). Neste sentido, a adoção de técnicas hídricas pode auxiliar no avanço de uma agricultura cada vez mais sustentável, em especial nas regiões com condições climáticas mais adversas, com baixo índice pluviométrico, irregular distribuição das chuvas e demanda atmosférica superior à precipitação (Marengo et al., 2016). Adicionalmente, o uso dessas tecnologias é uma ferramenta eficiente para intensificar a produção agrícola, na medida em que buscam evitar o desperdício de água e melhorar o aproveitamento dos demais recursos ambientais disponíveis. Essas estratégias podem, ainda, contribuir na minimização dos impactos sociais causados pela irregularidade na produção de alimentos em áreas com riscos de desertificação, como é o caso das regiões áridas e semiáridas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada entre os meses de abril a dezembro de 2020, utilizando bancos de dados *online*. Não houve exclusão de nenhum período na pesquisa e nenhuma restrição de idioma foi aplicada. Nesse sentido, a escolha das principais palavras-chave dessa revisão se baseou na relevância e na relação com os demais capítulos desse trabalho. As principais palavras-chave utilizadas foram: “Semiárido”; “desertificação”; “desertificação e seus impactos na agricultura”; “sustentabilidade na agricultura”; “técnicas hídricas”; “práticas de resiliência agrícola”; “indicadores ambientais de solo”; “indicadores

ambientais de clima”; indicadores ambientais de plantas”; “modelagem na agricultura”; “AquaCrop”; “calibração e validação de modelos”.

2.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA DESERTIFICAÇÃO E OS SEUS EFEITOS NAS ATIVIDADES AGROPECUÁRIAS

O processo de desertificação consiste em uma alteração nas terras — principalmente das zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas — decorrente tanto das características ambientais, como também das práticas antrópicas desenvolvidas nesses ambientes (Castro e Santos, 2020). Os efeitos provocados pela desertificação podem ser observados seja pela deterioração da vegetação, seja pela salinização e intensificação dos processos erosivos do solo com a consequente redução da sua biota e da fertilidade (Dregne, 1986; Verstraete e Schwartz, 1991).

Diversas causas podem intensificar ou acelerar o processo de desertificação, a saber: a erosão do solo, acentuada devido ao desmatamento e ao agravamento da seca determinada pela maior exposição do solo à ação de ventos secos e radiação solar (Conti, 2008); a salinização dos solos provocada pelo manejo inadequado como o uso incorreto de adubos químicos; irrigação com água de má qualidade; sistemas de irrigação de baixa eficiência; a ausência de utilização de práticas conservacionistas e adoção de sistemas de cultivos inadequados (Sharma et al., 2016). Além disso, outros fatores contribuem bastante para esse processo, tais como: queimadas e superpastejo de bovinos, de caprinos e ovinos em especial em áreas com fragilidade ambiental.

As áreas com risco de desertificação ocupam mais de 30% da superfície terrestre, abrangendo 100 países, onde habita mais de um bilhão de pessoas (Dourado, 2017). No Mapa Global da Vulnerabilidade à Desertificação (Figura 1) é possível constatar que a região mais afetada por este processo é o continente Africano, todavia é preciso ressaltar ainda o risco nas áreas da China; do Oriente Médio; da Austrália; do Sudeste dos Estados Unidos; do oeste e do leste da América do Sul (Cherlet et al., 2018).

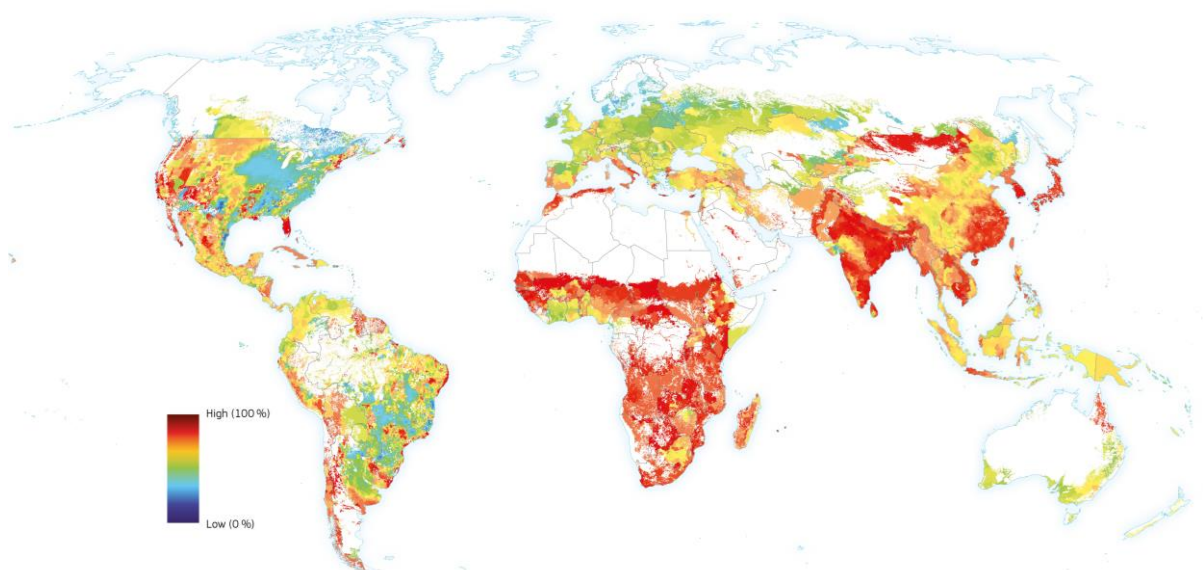


Figura 1. Mapa Global da Vulnerabilidade à Desertificação. Fonte: Atlas Mundial da Desertificação (2018).

Atualmente, muitos estudos têm buscado entender a desertificação, bem como os fatores que potencializam sua ação. Audu (2013) apontou estreita relação entre o desmatamento e o aumento das áreas de desertificação em diversos pontos da Nigéria. Por sua vez, Wijitkosum (2016), ao analisar o impacto do uso da terra no risco de desertificação em áreas degradadas na Tailândia, verificou que as atividades antrópicas que mais contribuem para esse processo são o excesso de cultivo e de pastagem, o desmatamento e os sistemas de irrigação mal drenados. No Brasil, mais especificamente no contexto do Semiárido, a desertificação possui ligação com o histórico de ocupação da região que, aliado às peculiaridades hidroclimáticas, faz com que os processos naturais se tornem mais agressivos (Albuquerque et al., 2020).

Corroborando com Soares et al. (2011), a desertificação aumenta o risco de mudança do clima de uma região, especialmente associado a alterações da cobertura vegetal do local, visto que a destruição da vegetação nativa é capaz de influenciar variáveis climáticas e meteorológicas, como temperatura do ar, a umidade do solo, o albedo e a rugosidade da superfície, além de influenciar no comportamento da atmosfera, nos fluxos de radiação, na dinâmica da evapotranspiração, e por conseguinte, afetar o ciclo hidrológico local (Charney et al., 1977; Sud e Molod, 1988; Oyama e Nobre, 2004; Rodrigues et al., 2019)

Diferentes impactos sociais podem surgir em função da desertificação. Esses impactos estão fortemente relacionados à diminuição da atividade agropecuária, que é desencadeada frente a este processo; à perda da biodiversidade; à degradação dos solos; à diminuição das áreas agricultáveis pela salinização; ao aumento das perdas econômicas; ao aumento da pobreza

e aumento migratório (Pan Brasil, 2004). Conforme é abordado por Araújo e Souza (2017), na agricultura as consequências da desertificação são bastante graves, porém os impactos mais severos são vistos na redução da capacidade de produção das terras. Nesse quesito, vários indicadores de produção agropecuária podem sofrer efeitos deletérios, como o rendimento e valor da produção agropecuária; evidenciados, por exemplo, por meio da diminuição da produção de leite, queda da produção de carne, bem como a redução na produtividade de várias culturas agrícolas (Jamala et al., 2013; Geidam e Sabo, 2014; Ferreira et al., 2018).

Na agricultura os impactos da desertificação refletem ainda nos processos como os ciclos de carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) nos ecossistemas agrícolas (An et al., 2019). Com efeito, Tang et al. (2016) mostraram que o conteúdo de nutrientes do solo diminuiu com o aumento do grau de desertificação, o que indica que a desertificação contribui para uma distribuição irregular dos nutrientes do solo tornando-o o estéril à medida em que a desertificação progride.

Fica evidente que não se pode negligenciar os impactos da desertificação, em especial para a agricultura. Para isso, o desenvolvimento de trabalhos voltados a contribuir para a produção agropecuária sustentável em áreas com riscos de desertificação, bem como para a mitigação dos fatores que contribuem para este processo, torna-se cada vez mais importante, especialmente, em decorrência das mudanças do clima.

2.2 AGRICULTURA VERDE: INTENSIFICAÇÃO SUSTENTÁVEL E IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO AGRÍCOLA

Muito se discute sobre os impactos do setor agropecuário nas mudanças climáticas. Em determinados campos de discussões, a agropecuária é apontada como a atividade antrópica mais perturbadora do meio ambiente, uma vez que alguns de seus modelos de produção são considerados os responsáveis por contribuir profundamente com o desequilíbrio sistêmico global (Struik e Kuyper, 2017).

De acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), a agricultura sustentável envolve fatores como conservação do solo, da água, dos recursos genéticos animais e vegetais, do ambiente, assim como o uso de técnicas apropriadas, economicamente viáveis e socialmente aceitáveis. Em outras palavras, a intensificação sustentável do sistema agrícola pode ser definida como a utilização de práticas de resiliência agrícola para o aumento da produção, e que atenda aos altos padrões de sustentabilidade

ambiental, econômica e social, isto é, um incremento simultâneo no uso dos recursos e na eficiência do uso destes (Pretty e Bharucha, 2014; Jordan e Davis, 2015; Hunter et al., 2017).

Além disso, no contexto dos agroecossistemas, alguns autores abordam a intensificação sustentável como sendo um conceito mais amplo, como é o caso de Struik e Kuyper, (2017) que dizem que:

“A eficiência no uso de recursos possui dimensões agronômicas, ambientais, econômicas, sociais, transgeracionais e globais. A intensificação sustentável deve ser considerada como um processo de investigação e análise para navegar e resolver os problemas e preocupações em agronomia. ”

A preocupação mundial acerca da intensificação sustentável do setor agrícola está atrelada ao aumento da demanda mundial por alimentos. Se por um lado a população mundial tem aumentado ao longo dos últimos anos, atingindo cerca de 7,9 bilhões de habitantes em 2020, com previsão de atingir 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2020), por outro lado as regiões de fronteiras agrícolas têm diminuído ao redor do mundo (Sambuichi et al., 2012). Em função disso, para atender a demanda crescente de alimentos, calcula-se que será necessário um aumento de pelo menos 100% da produção agrícola mundial (Tilman et al., 2011).

Em que pese o aumento populacional, há um interesse crescente da população no consumo de alimentos saudáveis e oriundos de sistemas menos impactantes ao meio ambiente. Godfray e Garnett (2014) reforçam que a adoção de sistemas mais sustentáveis, que aumentem não só a produção por meio dos ganhos em produtividade e diversificação de produtos, mas também gerem serviços ambientais, pode representar uma enorme vantagem competitiva, considerando um mercado mundial cada vez mais exigente quanto aos modos de produção.

Os países deverão se preocupar cada vez mais com a preservação do meio ambiente na implementação de políticas públicas voltadas ao setor agrícola. Para tanto, a busca pela intensificação da produção agropecuária deverá ser baseada em estratégias sustentáveis, tais como: uso de práticas conservacionistas; preservação da biodiversidade; maior eficiência na utilização da água e do solo; implementação dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta; entre outras estratégias menos impactantes ao meio ambiente (Pretty e Bharucha, 2014; Carvalho et al., 2018; Fortini et al., 2020).

Como o debate da intensificação sustentável está constantemente enraizado nas discussões sobre a Revolução Verde, muitas vezes o termo “verde” é inserido nas temáticas sobre a sustentabilidade agrícola futura. Nesse sentido, Kuyper e Struik (2014) observaram que termos como “mais verde”; “crescimento verde”; “sempre verde” e “novo verde” muitas vezes são adotados como termos retóricos no discurso da Revolução Verde.

Nesse âmbito, a “agricultura verde” nada mais é que uma maneira de atingir o crescimento agrícola e o desenvolvimento econômico, ao mesmo tempo que se evita a degradação ambiental e dos recursos naturais, e reduz as externalidades negativas ao passo que se utiliza os recursos com mais eficiência (Amaruzaman et al., 2017; Struik e Kuyper, 2017). A “agricultura verde” se baseia ainda em melhorar a biodiversidade, aumentar a renda dos agricultores, diminuir a poluição ambiental em escala global, contribuir para a segurança alimentar e promover desenvolvimento sustentável (Deng et al., 2018).

De acordo com Koohafkan et al. (2012), os sistemas agrícolas apropriados a enfrentar os desafios desencadeados pelas rápidas mudanças no planeta exigem vários atributos que constituem os elementos definidores de uma “agricultura verde”, entre estes, destacam-se:

- a) promover práticas que melhorem a disponibilidade de água limpa, sequestro de carbono, conservação da biodiversidade, do solo e da água etc.;
- b) capacidade adaptativa aprimorada com base na premissa de que a chave para lidar com mudanças rápidas e imprevisíveis é fortalecer a habilidade de respostas adequadas, para manter um equilíbrio entre adaptabilidade a longo prazo e eficiência a curto prazo;
- c) fortalecer a capacidade adaptativa e a resiliência do sistema agrícola;
- d) manter a diversidade para permitir várias respostas à mudança e garantir a preservação de funções-chave no agroecossistema.

Assim, se extrai que os sistemas agrícolas que serão resilientes a ponto de conviver e produzir de forma sustentável sob condições ambientais desafiadoras serão aqueles que apresentarem altos níveis de diversidade, produtividade e eficiência (Figura 2).



Figura 2. Características dos agroecossistemas quanto ao nível de resiliência. Fonte: adaptado de Koohafkan et al. (2012).

O plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono), por exemplo, incorpora bem o conceito de “intensificação sustentável”, e tem sido pauta de discussão em diversos encontros sobre o meio ambiente ao redor do mundo, tais como o Acordo de Paris, ECO 92 e RIO+20 (Viola e Franchini, 2012). A agricultura de baixo carbono envolve a redução de intensidade de carbono do PIB; redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) per capita; uso eficiente das matérias-primas; aumento na eficiência no uso da água; proteção da biodiversidade; diminuição do uso de agrotóxicos na agricultura e maximização das energias renováveis na matriz energética (Viola e Franchini, 2012; Fogarassy e Nabradi, 2015; Gurgel e Laurenzana, 2016).

Dessarte, os sistemas de integração, quais sejam: integração lavoura-pecuária – ILP; (agropastoril); integração pecuária-floresta – IPF (silvipastoril); integração lavoura-floresta – ILF (silviagrícola); integração lavoura-pecuária floresta – ILPF (agrossilvipastoril), são considerados como estratégias a serem adotadas para implementação de uma Agricultura de Baixo Carbono (ABC) (Ginkel et al., 2013; Carvalho et al., 2014).

Segundo Carvalho et al. (2018), os sistemas integrados são projetados para criar e melhorar os sinergismos ecossistêmicos de áreas de produção integradas à floresta e/ou pecuária. Nesse contexto, os benefícios da integração são dinâmicos entre si, mas podem ser explicados nos contextos: agrônomo, por meio da preservação e sustentação da capacidade produtiva do solo; econômico, uma vez que promove a diversidade da produção de alimentos com segurança e rendimentos mais altos a custos menores; ecológico, já que reduz a necessidade de insumos nocivos ao meio ambiente; e social, porque reduz o êxodo rural com o aumento de novas oportunidades de emprego nas áreas rurais.

Portanto, as técnicas de produção apropriadas a enfrentar as adversidades ambientais das regiões com baixa disponibilidade hídrica não se resumem apenas na utilização de um único sistema de produção, mas sim na adoção de estratégias que podem incorporar diversas tecnologias e, até mesmo, diversos sistemas de produção com uma visão holística do agroecossistema.

2.3 TÉCNICAS HÍDRICAS RECOMENDADAS PARA REGIÕES COM BAIXA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

O déficit de água ocorre na maioria dos habitats naturais ou agrícolas e é causado principalmente por períodos intermitentes ou mesmo contínuos sem precipitação. Sob estas condições, sérios prejuízos às plantas podem ocorrer, seja durante seu crescimento vegetativo, seja durante o reprodutivo (Shinozaki et al., 2015; Taiz et al., 2017). No entanto, para

minimizar os impactos sobre as plantas de ambientes em que o déficit hídrico ocorre regularmente, pode-se lançar mão do uso de técnicas hídricas.

As técnicas hídricas consistem em estratégias que possibilitam a conservação dos recursos hídricos e que favorecem a potencialização sustentável do uso da água aplicada nos sistemas de produção (Kannan e Anandhi, 2020). São exemplos disso: o cultivo sob condição deficitária de água no solo em pequenas áreas; a adoção de espécies resistentes ao estresse hídrico; uso de clones/cultivares mais adaptados a um determinado ambiente; intensidade de corte; cultivo adensado, para melhoria da utilização por unidade de área hidricamente irrigada; uso de cobertura morta para melhorias térmico-hídricas e nutricionais do cultivo; consorciação entre culturas em sistema de plantio intensivo.

Em síntese, as técnicas hídricas se enquadram nas práticas agrícolas sustentáveis, uma vez que objetivam melhorar a eficiência no uso da água e consequentemente reduzir a pressão ambiental, mitigar o processo de desertificação, evitar a erosão e a salinização do solo, de modo resultar em melhorias da sustentabilidade de produção (Queiroz et al., 2016; Wang et al., 2016; Tuğrul et al., 2020).

O conceito de eficiência no uso da água foi introduzido há mais de 100 anos por Briggs e Shantz (1913), e, no contexto agrícola, expressa uma relação entre a produtividade da planta e o uso da água. Mais especificamente pode-se entender como a relação de aumento da quantidade de biomassa produzida por unidade de água usada por uma planta (Hatfield e Dold, 2019).

O manejo eficiente no uso da água, ao mesmo tempo em que contribui com o ambiente, reflete na redução de custos de produção. Nesse aspecto, Queiroz et al. (2016) ao estudarem as relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido, mostraram que a eficiência no uso da água tendeu a diminuir à medida em que se aumenta as lâminas de água aplicadas, por outro lado, o retorno econômico da cultura tende a ser maior conforme o aumento da eficiência no uso da água. Ainda, Sun et al. (2016) reforçam que a eficiência no uso da água leva em consideração não só a eficiência na sua aplicação, mas também a eficiência no seu transporte até os cultivos.

Sob esta perspectiva, o entendimento da demanda de água pelas culturas, por meio da quantificação da evapotranspiração das culturas (ETc) tem sido de grande importância. Bezerra et al. (2015) estudaram o desenvolvimento fenológico do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.) em dois anos (safras) sob condições de irrigação no Semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. Os autores evidenciaram que, a variabilidade climática interanual, resultou em respostas distintas da cultura, evidenciadas na duração de seu ciclo, na sua demanda hídrica e nas suas

variáveis de crescimento. Silva et al. (2019) mostraram que o manejo eficiente no uso da água favorece a convivência com o Semiárido e a mitigação dos efeitos que a alta variabilidade climática proporciona sobre as plantas cultivadas. Azevedo et al. (2016), ao estudarem a cultura do melão irrigado por gotejamento em uma área inserida no Semiárido do Brasil, verificaram que o déficit hídrico controlado pode ser uma alternativa para aumentar a eficiência no uso da água. Por seu turno, Mila et al. (2017) constataram que a irrigação deficitária é uma técnica eficaz para regiões com escassez de água, os autores alcançaram a eficiência máxima no uso da água irrigando 60% do déficit da zona radicular em estágio vegetativo e pré-florado na cultura do girassol (Variedade: BARI Surjomukhi-2) nas condições de clima semiárido de Bangladesh. Por sua vez, Andrade Júnior et al. (2019) ao testarem diferentes níveis de seca controlada em dois híbridos simples de sorgo forrageiro, verificaram que os níveis de estresse não alteraram a composição químico-bromatológica e o teor de matéria seca dos híbridos, além constatarem maior produtividade da água com as menores lâminas de água.

O uso da irrigação de modo complementar, visando o uso eficiente dos recursos hídricos, deve ser integrada com as demais técnicas hídricas, como o uso de cobertura morta, utilização de sistemas de irrigação de maior eficiência como o gotejamento, utilização de cultivares/clones adaptadas, consórcio entre culturas, plantio adensados, entre outras.

Os estudos envolvendo cultivares ou clones de plantas forrageiras resistentes ao déficit hídrico são bastante evidenciados nas regiões semiáridas ao redor do mundo, consistindo em uma importante técnica hídrica, reportada, por exemplo, nos trabalhos de Shargui et al. (2014); Araya et al. (2016); Guimarães et al. (2016); Andrade Júnior et al. (2019) e Wang et al. (2019). Nesse contexto, destaca-se o uso de clones de palma forrageira resistentes as pragas (como a cochonilha do carmim), ao déficit hídrico e a salinidade do solo e da água, como uma importante alternativa para produção de forragem em regiões semiáridas (Lima et al., 2018). Outrossim, espécies da família Poaceae, como o sorgo e o milheto podem ser alternativas viáveis nesse sentido (Bouazzama et al., 2012; Diniz et al., 2017).

O uso de cobertura morta no solo é outra estratégia que vem sendo difundida ao longo dos anos, inclusive nos modelos de agricultura de alta tecnologia. Seu uso permite extrair diversos benefícios ao sistema, tais como: o aumento da eficiência no uso água; a redução do desenvolvimento das plantas daninhas; a diminuição da amplitude térmica das camadas superiores do solo; incremento da biomassa microbiana; promove melhorias nas características físicas do solo; além de minimizar a erosão hídrica no solo (Stefanoski et al., 2013; Nawaz et al., 2016; Ran et al., 2018; Zang et al., 2020). Nesse contexto, Chen et al. (2018) mostraram que o uso de cobertura morta incrementa o teor de nitrogênio e de carbono orgânico do solo

(SOC) no sistema de monocultivo do milho. Nessa linha, Huo et al. (2017) também evidenciaram que o incremento de cobertura morta na camada subsuperficial atrelada ao uso de cobertura de plástico aumentou significativamente o SOC após 4 anos, e o aumento desta variável apresentou correlação positiva com a dessalinização.

Uma outra técnica hidricamente eficiente muito estudada trata-se do consórcio entre culturas. Essa estratégia envolve duas ou mais espécies de cultivo crescendo juntas e coexistindo por um tempo (Bi et al., 2019). Assim, o consórcio é uma prática que mostra bons desempenhos no quesito aproveitamento de água em regiões semiáridas, visto que aumenta a otimização do uso da terra e da água e dos nutrientes para o desenvolvimento das culturas (Gebbru, 2015; Fung et al., 2019; Yin et al., 2020b). Um exemplo reside no consórcio forrageiro cacto-sorgo, que proporciona uma vantagem biológica e capacidade competitiva, com maior índice produtivo que monoculturas destas espécies (Farias et al., 2000; Diniz et al., 2017). Nesse contexto, Costa et al. (2018) também evidenciaram um maior aproveitamento dos recursos e maior qualidade de silagem do consorcio de *Pennisetum glaucum* (L.) R. (milheto) com outras forrageiras, entre elas a *Brachiaria brizantha* cv. BRS Paiaguás. Nessa temática, Oliveira Filho et al. 2016 demonstraram que o consórcio de mamona com milho atrelado ao aumento de densidade de plantas da cultura principal (mamona) aumentou a eficiência no uso da terra. Por sua vez, Couto et al., 2020 evidenciaram que o consórcio adensado de *Lactuca sativa* (alface) em hortas agroflorestais manteve a produtividade da espécie ao passo que reduziu a quantidade de insumos. Paralelamente, cabe ressaltar, que escolhas inadequadas de arranjos e densidades de plantas no sistema consorciado pode proporcionar uma competição acentuada entre as espécies, de modo que o rendimento individual venha a ser inferior ao obtido em cultivo solteiro. Por isso, recomenda-se, além de se medir o rendimento, ponderar outros índices que ajudem na tomada de decisão do melhor arranjo no consórcio.

Dessarte, no contexto ambiental de regiões Semiáridas, em que muitos estudos demonstram altos riscos de desertificação, as técnicas hídras são ferramentas para mitigar os impactos ambientais bem como diminuir a disparidade hídrica espaço-temporal da umidade do solo, a fim de garantir uma menor estacionalidade da produção agrícola caracterizando-se, portanto, como estratégias imprescindíveis para a convivência nestes ambientes.

2.4 INDICADORES AMBIENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou indicadores com alguma relação entre si, com diferentes níveis de interações que podem afetar o seu desempenho (Adams et al., 2013). Num sistema agrícola, os indicadores relacionados ao solo, planta e atmosfera são considerados aqueles de maior importância, logo, a caracterização é essencial. No entanto, a depender do objetivo do estudo, a interação de fatores bióticos como patógenos e artrópodes no sistema podem ser levados em consideração (Fiorini et al., 2020).

Os indicadores do solo podem ser químicos, físicos e/ou biológicos. Os químicos estão relacionados principalmente à fertilidade, pH, disponibilidade de fósforo, capacidade de troca catiônica, ciclagem de nutrientes, nitrogênio orgânico, teor de carbono orgânico no solo, teor de matéria orgânica, salinidade e a presença ou não de metais pesados (Cardoso et al., 2013; Li et al., 2019; Huera-Lucero et al., 2020). Já os principais caracterizadores físicos do solo dizem respeito, principalmente, a sua densidade, porosidade, condutividade hidráulica, potencial erosivo, estrutura, consistência, compactação e topografia da área (Stefanoski et al., 2013; Nawaz et al., 2013; Bünemann et al., 2018; Hao et al., 2019; Yin et al., 2020b).

Os indicadores biológicos do solo estão relacionados à abundância individual de determinados microrganismos e artrópodes e suas atividades ou funções (Bünemann et al., 2018). Na maioria dos trabalhos, quando se estudam indicadores biológicos do solo, são verificadas, por exemplo, a concentração ou a população de minhocas, nematoides, cupins, formigas e biomassa microbiana, além de índices de respiração do solo, mineralização de nitrogênio, nitrogênio potencialmente mineralizável (Griffiths et al., 2018; Huera-Lucero et al., 2020; Fiorini et al., 2020). Os indicadores biológicos incluem ainda processos metabólicos, como a respiração, usados para mensurar a atividade microbiana relacionada à decomposição da matéria orgânica no solo, síntese de DNA e proteínas, atividades enzimáticas e o quociente metabólico (qCO_2), que está associada à mineralização do substrato orgânico e é determinado pela razão respiração/biomassa microbiana (Adetunji et al., 2017; Bünemann et al., 2018; Schlöter et al., 2018; Li et al., 2019; Huera-Lucero et al., 2020).

Além disso, quando se fala especificamente de um sistema agrícola, as práticas antrópicas relacionadas ao manejo e condução da atividade, apesar de não serem indicadores ambientais propriamente dito, afetam diretamente no comportamento desse sistema, uma vez que podem influenciar nas características ou nos seus indicadores. Com efeito, estudos são desenvolvidos no sentido de verificar a contribuição de diferentes tipos e níveis de manejos no

agroecossistema e consequentemente no desempenho de culturas agrícolas, a fim de subsidiar a elaboração de modelos matemáticos que mensurem esse efeito. Um exemplo disso, está no trabalho de Fiorini et al. (2020), que ao estudarem os efeitos do plantio direto durante 7 anos nas características de diferentes tipos de solos levando em consideração sistemas de cultivo para produção de silagem e grãos, constaram que essa prática induz a alterações nos indicadores de qualidade do solo como o aumento do estoque de carbono na camada superficial e aumento na quantidade de microartrópodes por metro quadrado de solo, reforçando ainda que a adaptação e proliferação da fauna do solo é um dos principais sinalizadores da qualidade do solo.

Ainda dentro do sistema agrícola, os atributos relacionados a planta assumem extrema importância, uma vez que estes, na maioria das vezes, indicarão a tolerância das plantas a determinados estresses e consequentemente definem a produtividade. Nesse contexto, indicadores como a taxa fotossintética, eficiência no uso da radiação, taxa de absorção de água e de nutrientes, parâmetros de competição intra e interespecífico e parâmetros considerados na determinação de indicadores da planta a estresses abióticos podem ser utilizados na elaboração de modelos de simulação (Willey e Rao, 1980; Ashraf e Harris, 2004; Renato et al., 2018; Khusanbayevich et al., 2020). Não obstante, atributos relacionados à fenologia, como cobertura do dossel, duração do ciclo, características do sistema radicular e senescência, são utilizados em modelos de simulação (Dubey e Sharma, 2018; Li et al., 2019)

Por fim, destacam-se os atributos agrometeorológicos, que são recursos ambientais diretamente relacionados com o crescimento e desenvolvimento das plantas, tendo sido utilizados neste caso, variáveis como: precipitação, temperatura do ar, umidade relativa e radiação fotossinteticamente ativa. Essas têm sido usadas de maneira isoladas ou para obtenção de outros indicadores como é o caso da eficiência no uso da radiação ou dos graus dias acumulados (Coblentz et al., 2018), e de um modo geral, têm sido bastante aplicados nos trabalhos de modelagem e simulação da produtividade agrícola (Paltasingh et al., 2012). Souza et al. (2018) utilizaram variáveis como amplitude térmica, temperaturas máxima, média e mínima, precipitação e índice de umidade como indicadores para o zoneamento agrícola da palma forrageira para o estado de Sergipe, Brasil. Por sua vez, Powell e Reinhard (2016) utilizaram, entre outros, temperatura e precipitação em diferentes cenários climáticos para simular a produtividade de trigo em diferentes condições de eventos extremos para a Holanda. Por sua vez, Paltasingh et al. (2012) utilizaram o índice de aridez na simulação de rendimento de culturas agrícolas na China.

2.5 A MODELAGEM PARA ANÁLISE DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Um modelo matemático busca representar de forma simplificada um determinado sistema, com o qual é possível fazer previsões que podem ser comparadas com as observações reais de um evento ou fenômeno da natureza (Rivett, 1980). Com efeito, Tucci (2005) conceitua um modelo como sendo a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Modelos podem ainda ser definidos como sistemas conceituais compostos por informações, operações e regras que conduzem as interações que são expressas usando sistema de notação externa e que são usados para construir, descrever, relacionar ou explicar os comportamentos de outro sistema, com objetivo que este sistema possa ser manipulado ou previsto de forma inteligente e com nível de confiança (Lambin, 1997; Sodré, 2007).

A modelagem matemática faz parte da vida do homem desde os tempos remotos, quando já se utilizava de noções matemáticas para modelar e resolver problemas que surgiam. Entre os clássicos modelos mais importantes criados pelo homem, pode-se citar: a roda inventada pelos Sumérios no ano 3000 a.C.; o modelo criado por Eratóstenes (276-196 a.C) para calcular a circunferência da Terra; e os modelos criados por Galileu-Galilei (1564-1642) para explicar a queda dos corpos e o movimento elíptico dos projéteis (Refeldt, 2010).

Conforme relatado por Turban et al. (2004), a simulação necessita de um modelo que, geralmente, busca assumir a aparência das características da realidade, ou seja, simulá-la de maneira mais próxima possível. Segundo estes autores, a simulação caracteriza-se ainda como uma ótima ferramenta para realizar experiências que podem antecipar os resultados e as características de um determinado sistema, levando em consideração seus indicadores, atributos ou componentes. Nesse aspecto, a escolha das variáveis utilizadas dependerá do objetivo do estudo, e geralmente são escolhidos aqueles que mais influenciam o comportamento do objeto a ser estudado (Nikulina et al., 2019).

Os modelos de simulação podem ser classificados em empíricos ou fenomenológicos; determinísticos ou probabilísticos; estáticos ou dinâmicos; discretos, contínuos ou combinados (Law, 1991). Em síntese um modelo empírico é aquele desenvolvido somente adotando informações experimentais, ou seja, sem informações teóricas sobre o fenômeno estudado. Neste tipo de modelo os dados experimentais são observados de modo a buscar explicações intuitivas (Angell et al., 2008). Por sua vez, o modelo é fenomenológico quando é construído a partir de princípios fundamentais, inerente ao fenômeno estudado (Basmadjian e Farnood, 2006).

O sistema determinístico é modelado analiticamente, logo, é adotado à medida em que o modelo se torna mais simples e envolve menos variáveis ou interações entre seus componentes (Maria, 1997). Em outras palavras, um modelo determinístico supõe certas condições que, se alcançadas, determinam um resultado esperado em um experimento (Bartlett, 1956; Irwin e Wang, 2014). É considerado um modelo probabilístico quando os dados que o compõem são oriundos de eventos aleatórios e conduzem a saídas aleatórias. E ao contrário da situação determinística a simulação probabilística está mais próxima da realidade, em sistemas com altas taxas de variação nos objetos que o compõem (Kettenis, 1992).

Os modelos estáticos são aqueles aplicados nas situações em que o tempo é irrelevante para os sistemas, com foco em alguma característica relevante para o sistema (Hosseinalipour et al., 2013). Já os modelos dinâmicos representam sistemas que mudam por meio do tempo, ou seja, sua característica principal é a presença de uma variável indexada representando o tempo do sistema com foco no comportamento do sistema (Safiullin e Safiullin, 2018).

O modelo de simulação é discreto se todas as variáveis de estado têm seus valores alterados apenas em um número contável de instantes de tempo ou em pontos no espaço (instantes pontuais). Ou seja, as variações do sistema estão associadas a eventos característicos que mudem o seu estado. Sistemas contínuos podem ser discretizados se a passagem do tempo é feita em intervalos de um evento a outro. Neste caso supõe-se que o estado do sistema não se altera ao longo do intervalo entre a ocorrência dos dois eventos consecutivos, isto é, não se altera de forma sucessiva (Bogado et al., 2011). No modelo de simulação contínuo, todas as variáveis de estado têm seus valores alterados a qualquer instante de tempo ou em qualquer ponto do espaço, seguindo incrementos pré-definidos. A discretização dos sistemas contínuos é muito comum em virtude do método empregado e do próprio computador, sendo muito adotada no estudo dos sistemas que envolvem equações algébricas diferenciais (Gustafsson et al., 2017). Por outro lado, naqueles modelos considerados combinados (contínuos/discretos), as variáveis independentes podem se alterar tanto de forma discreta quanto contínua, e o comportamento do sistema é simulado pelo exame das variáveis em pequenos incrementos de tempo e os atributos das entidades na ocorrência dos eventos (Kettenis, 1992).

Após a elaboração de um modelo matemático, é necessário realizar a sua calibração e validação para constatar se produz os resultados projetados e inferir sobre sua precisão (Davis, 1992). Na calibração é verificado se a lógica do modelo foi corretamente programada e se não existem erros como variáveis fora de faixa (Fontoura Júnior et al., 2010). Já a validação é uma etapa para constatar a possível adequabilidade do modelo matemático caracterizador de um

sistema estudado, isto é, determinar se sua inferência sobre o sistema real está correta para algum nível de confiança aceitável, e considerando dados independentes da calibração (Carson, 1986). Conforme Robinson (1992), a verificação e validação de um modelo é indispensável para colocar a confiança nos resultados obtidos no estudo.

A aplicação de simulações baseadas em modelagem matemática tem crescido em todas as áreas, auxiliando os gestores na tomada de decisão em problemas complexos e possibilitando um melhor conhecimento da influência dos componentes de um sistema. Um dos avanços do uso da modelagem tem sido nos estudos de processos físicos, com aplicações, por exemplo, em estudos climáticos; dinâmica populacional e impacto ambiental; Hidrologia; Geotecnologia; Agrometeorologia (Morrison e Kolden, 2015; Ethier et al., 2018; Akinseye et al., 2020; Liu e Basso, 2020).

Há mais de dois séculos que a modelagem matemática é utilizada com intuito de mensurar os efeitos das variáveis ambientais relacionadas ao crescimento e desenvolvimento das mais variadas culturas agrícolas. No entanto, só a partir de 1950 aconteceu o desenvolvimento de trabalhos mais elaborados que formalizaram o que seria a base para estudos envolvendo a aplicação da modelagem na agricultura (Zadoks e Rabbinge, 1985; Corrêa et al., 2011). Os primeiros trabalhos de grande relevância nesse sentido, e que ainda hoje são tidos como referência, foram desenvolvidos por Wit (1958) e Wit (1968), estes trabalhos despertaram o interesse de vários pesquisadores de diversos países, inclusive no Brasil, a desenvolverem trabalhos no contexto da modelagem na agricultura. No trabalho de Wit (1958) intitulado "Transpiration and crop yield" o autor reforçou por meio de modelos a relevância da transpiração na produção agrícola em diferentes condições, já em 1968, o clássico trabalho "Photosynthesis of leaf canopies" o autor enfatizou a importância de se calcular o efeito de certos fatores ambientais na taxa de fotossíntese.

2.6 MODELO AQUACROP

O modelo AquaCrop é um software que foi desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da FAO em 2009 e é disponibilizado gratuitamente (<http://www.fao.org/AquaCrop/en/>). Tem a finalidade de auxiliar a gestão e produção agrícola em relação ao efeito da água sobre a produção. Atualmente o software está na sua versão 6.1, e propõe uma modelagem do rendimento de culturas agrícolas com simulação de crescimento e determinação da produtividade real em função da cobertura do dossel, adotando a água como um fator limitante (Akumaga et al., 2018; Bouras et al., 2019).

O AquaCrop pode ser usado para investigar uma série de assuntos relacionados à produção vegetal, de modo a facilitar o entendimento do comportamento da cultura em variados contextos ambientais, e em escalas regional e global para prever ou explorar o potencial produtivo sob certas condições, consistindo em uma ferramenta de gerência e tomada de decisão (Dubey e Sharma, 2018).

Conforme pode ser observado na figura 3, o modelo usa entradas separadas de componentes climáticos (chuva, evapotranspiração e temperaturas máximas e mínimas); parâmetros de cultivo (como densidade, duração do ciclo, kc, produtividade da água, cobertura inicial do dossel, entre outros); manejo (irrigação e práticas de campo); e solo (características físicas e capacidade de armazenamento) para simulação. A simulação diária do desenvolvimento e crescimento da cultura é integrada ao balanço hídrico do solo, que fornece uma plataforma robusta e precisa para representar diferentes cenários de manejo agrícola com a água sendo um fator limitante na produção (Steduto et al., 2009; Dubey e Sharma, 2018).

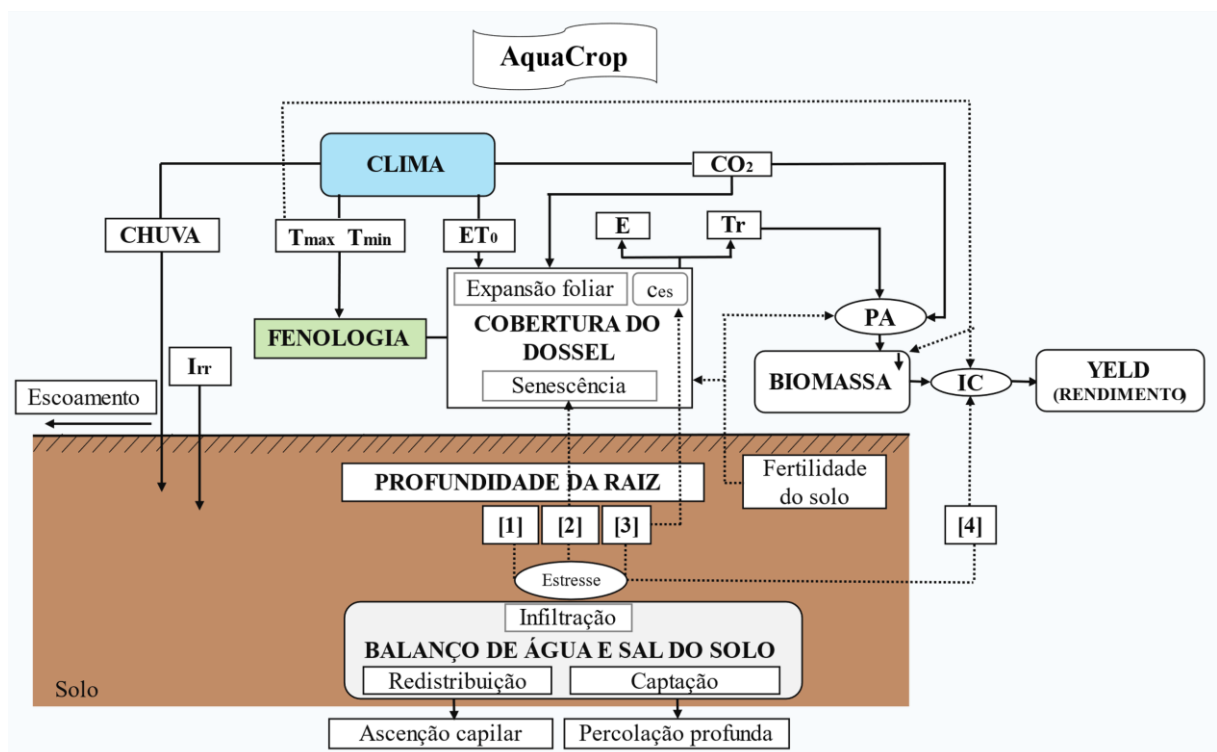


Figura 3. Fluxograma do AquaCrop evidenciando os principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera e os parâmetros de fenologia, cobertura do dossel, transpiração, biomassa e rendimento final [Irr, irrigação; T_{min} , temperatura mínima do ar; T_{max} , temperatura máxima do ar; ET_0 , evapotranspiração de referência; E, evaporação do solo; Tr, transpiração; Ces, condutância estomática; PA, produtividade da água; IC, índice de colheita; CO₂, concentração de CO₂ atmosférico; (1), (2), (3), (4), diferentes funções de resposta ao estresse hídrico]. Linhas contínuas indicam links diretos entre variáveis e processos. Linhas tracejadas indicam feedbacks. Fonte: adaptado de Steduto et al. (2009)

Desde que o modelo foi lançado, vários estudos buscaram calibrá-lo e validá-lo para culturas diversas. Mkhabela e Bullock (2012) obtiveram precisão aceitável na calibração e validação do modelo AquaCrop para simulação de rendimento de grãos de trigo e teor de água do solo em uma área do Canadá. Dubey e Sharma (2018), nas condições edafoclimáticas do Rajastão, Índia, calibraram e validaram o AquaCrop para prever o rendimento do milho, do trigo e da cevada sob dois cenários de mudanças climáticas para o período futuro de 2021-2050. Por sua vez, Abedinpour et al. (2012) obtiveram erro entre 2,5 e 27,5 % na validação do AquaCrop para variáveis de produtividade do milho em um ambiente semiárido da Índia usando dados experimentais de dois anos (2009 e 2010).

Os modelos de simulação representam importantes ferramentas que auxiliam no entendimento antecipado dos efeitos das alterações do ambiente, e, podem auxiliar no planejamento das nações para se conviver com tais mudanças.

2.7 MUDANÇAS CLIMÁTICAS: CENÁRIOS FUTUROS E SEUS EFEITOS NOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

As projeções de clima futuro são oriundas de esforços conjuntos de grupos de modelagem climática de todo o mundo, em que diversos modelos climáticos globais (MCGs) são utilizados no sentido de realizar projeções de clima futuro. Essas projeções fazem parte da sexta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 – CMIP6) (Eyring et al., 2016), sendo avaliadas nos mais recentes relatórios do IPCC (IPCC, 2018; IPCC, 2021).

As projeções climáticas fornecidas pelos MCGs do CMIP6 são baseadas em cenários de forçantes radiativas, denominados Caminhos Representativos de Concentrações (Representative Concentration Pathways - RCPs) (Taylor et al., 2012). Neste caso, a forçante radiativa expressa a variação do balanço de energia incidente e da energia emergente do sistema climático em relação à época pré-industrial, sendo expressa em termos de energia (W/m^2). Nesse aspecto, uma forçante positiva induz a um aquecimento do sistema Terra-Atmosfera, enquanto a radiativa negativa induz a um resfriamento (Taylor et al., 2012; McBride et al., 2020).

As simulações realizadas pelo Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) são com base nos valores da forçante radiativa ao final do século XXI. Entre os cenários, têm-se os RCPs 4,5 e 8,5. O primeiro é baseado em emissões intermediárias, em que a forçante radiativa

estabiliza em valores próximos de $4,5 \text{ W/m}^2$ ao final do século XXI. O segundo é o cenário de alta emissão, no qual a forçante radiativa cresce ao longo do século XXI atingindo valores da ordem de $8,5 \text{ W/m}^2$ em 2100 (Eyring et al., 2016).

Uma das principais preocupações relacionadas aos efeitos das mudanças climáticas diz respeito aos impactos negativos que podem proporcionar na produtividade do setor agrícola em todo o mundo (Parker et al., 2019). Muitos estudos abordam que determinadas regiões poderão ser mais vulneráveis a esses efeitos e, logo, mais propícias aos problemas sociais relacionados à produção de alimentos (Dwivedi et al., 2013; Kocur-Bera, 2019). A ocorrência de eventos extremos, como recorde de temperaturas máximas e mínimas, secas e cheias intensas, diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da concentração de CO_2 atmosférico deverão contribuir para um planeta em que as condições ambientais para produzir alimentos serão mais desafiadoras (Parker et al., 2019).

No âmbito da segurança alimentar, há uma preocupação mundial acerca dos possíveis impactos das alterações no clima nos sistemas de produção de alimentos. Nessa perspectiva, trabalhos tentam quantificar as possíveis alterações esperadas e os impactos sobre o desenvolvimento e produtividade das culturas agrícolas (Hatfield e Prueger, 2015; Dubey e Sharma, 2018; Nunes et al., 2019). Nessa linha, Guimarães et al. (2016) ao investigarem projeções de mudanças climáticas sobre o Nordeste brasileiro apontaram que alguns cenários sugerem aumento de temperatura entre $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4,0 \text{ }^\circ\text{C}$ e aumento da evapotranspiração de referência (ET₀) de 15% até o final do século sobre esta região. De acordo com o relatório de 2018 do IPCC, considerando um cenário mais pessimista, a temperatura global poderá superar um aumento de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ até o final do século XXI. O mesmo relatório aponta que a última década foi a mais quente já registrada e, que esse aumento nas temperaturas deverá reduzir safras e acarretar impactos negativos nos ecossistemas naturais (IPCC, 2018).

Estudos indicam que as mudanças climáticas proporcionarão impactos diferentes de acordo com as regiões do planeta (Mancosu et al., 2015). Nesse cenário, é esperado que a distribuição temporal e espacial das chuvas de muitas regiões, a radiação solar e o CO_2 atmosférico sejam fortemente afetados pelas mudanças climáticas e impacte os sistemas de produção da maioria das culturas agrícolas (Grossi et al., 2015; Ochieng et al., 2016; Parker et al., 2019).

Grande parte das pesquisas realizadas nesse contexto, se alinham no sentido de que, até certo ponto, o aumento térmico pode melhorar pontualmente os rendimentos das safras, porém caindo drasticamente com os valores de temperatura ligeiramente superiores. Hatfield e Prueger (2015) ao avaliar o possível impacto de cenários com aumento de temperatura sobre a cultura

do milho, relata que o maior impacto sobre a cultura será durante o estágio reprodutivo do desenvolvimento com a produção de grãos sendo significativamente reduzida entre 80-90% em comparação a um regime de temperatura normal. Por sua vez, Sultan et al., (2014) preveem que a produção de grãos de sorgo reduzirá entre 16 e 20% em um cenário, para o período de 2031 a 2060, com elevação de temperatura em 2,8 °C.

Portanto, considerando os efeitos deletérios que os cenários de mudanças climáticas proporcionarão aos sistemas de produção agrícola, é imprescindível o debate mundial na busca de estratégias claras de resposta de mitigação e adaptação para lidar com as ameaças representadas pelas mudanças climáticas.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Processos como as mudanças do clima e a desertificação podem alterar de sobremaneira a capacidade produtiva de regiões semiáridas. De encontro a isso, é imprescindível lançar mão de estratégias, tais como as técnicas hídricas, que aumentam a sustentabilidade da agricultura, especialmente no que diz respeito a eficiência no uso da água. Adicionalmente, o uso da modelagem matemática no contexto das práticas sustentáveis pode contribuir para antecipação dos impactos da mudança do clima e na construção de estratégias resilientes para os agroecossistemas do futuro imediato, problemática de extrema relevância para as regiões suscetíveis a desertificação, como os ambientes semiáridos. Nesse sentido, uma visão holística dos agroecossistemas é primordial no sentido de buscar e difundir estratégias de melhor convivência com as alterações ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 Manage*, 110, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.04.001>
- Adamo S. B.; Crews-Meyer, K. A. (2006). Aridity and desertification: exploring environmental hazards in Jachal, Argentina. *Applied Geography*, 26(1), 61-85. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2005.09.001>
- Adams, K. M.; Hester, P. T.; Bradley, J. M.; Meyers, T. J.; Keating, C. B. (2013). Systems Theory as the Foundation for Understanding Systems. *Systems Engineering*, 17(1), 112-123. <https://doi.org/10.1002/sys.21255>
- Adetunji, A. T.; Lewu, F. B.; Mulidzi, R.; Ncube, B. (2017). The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. *Journal of soil*

- science and plant nutrition*, 17(3), 794-807. <http://dx.doi.org/10.4067/S07-18-95162017000300018>
- Akinseye, S. M.; Ajeigbea, H. A.; Traore, P. C. S.; Agelee, S. O.; Zemadimc, B.; Whitbreadf, A. (2020). Improving sorghum productivity under changing climatic conditions: A modelling approach. *Field Crops Research*, 123, 107685. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107685>
- Akumaga, U.; Tarhule, A.; Piani, C.; Traore, B.; Yusuf, A. (2018). Utilizing Process-Based Modeling to Assess the Impact of Climate Change on Crop Yields and Adaptation Options in the Niger River Basin, West Africa. *Agronomy*, 8(2), 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy8020011>
- Albuquerque, D. S.; Souza, S. D. G.; Souza, A. C. N.; Sousa, M. L. M (2020). Cenário da desertificação no território brasileiro e ações de combate à problemática no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 5, 673-696. <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v55i0.73214>
- Amaruzaman, S.; Leimona, B.; Noordwijk, M.; Lusiana, B. (2017). Discourses on the performance gap of agriculture in a green economy: a Q-methodology study in Indonesia. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services e Management*, 13(1), 233-247. <https://doi.org/-10.1080/21513732.2017.1331264>
- An, H.; Tang, Z.; Keesstra, S.; Shangguan, Z. (2019). Impact of desertification on soil and plant nutrient stoichiometry in a desert grassland. *Scientific Reports*, 9(1), p.1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45927-0>
- Andrade Júnior, I. O.; Santos, S. R.; Kondo, M. K.; Oliveira, P. M.; Rocha Júnior, V. R. (2019). Response of forage sorghum to water availability in a typic quartzipsamment. *Revista Caatinga*, 32(4), 1015 – 1026. <https://doi.org/10.1590/198321252019v32n418rc>
- Angell, C.; Kind, P. M; Henriksen, E. K.; Guttersrud, O. (2008). An empirical-mathematical modelling approach to upper secondary physics. *Physics Education*, 43(3), 256-254. <https://doi.org/10.1088/0031-9120/43/3/001>
- Araújo, J. A.; Souza, F. R. (2017). Abordagens sobre o processo de desertificação: uma revisão das evidências no Rio Grande do Norte. *Geosul*, 32(65), 122-143. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2017v32n65p122>
- Araya, A.; Kisekka, I.; Holman, J. (2016). Evaluating deficit irrigation management strategies for grain sorghum using AquaCrop. *Irrigation Science*, 34, 465–481. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0515-7>
- Ashraf, M.; Harris, P. J. C. (2004) Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, 166, 3-16. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.10.024>
- Audu, E.B. (2013). Fuel Wood Consumption and Desertification in Nigeria. *International Journal of Science and Technology*, 3(1), 1-5. <https://www.semanticscholar.org/paper/Fuel-Wood-Consumption-and-Desertification-inAudu/b1969985dd194e80fa381b7132fd118226266f30>
- Azevedo, B. M.; Bomfim, G. V.; Nascimento Neto, J. R.; Viana, T. V. A.; Vasconcelos, D. V. (2016). Irrigation depths and yield response fator in the productive phase of yellow melon. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(4), 1-13, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452016802>
- Balyan, S.; Kumar M.; Mutum, R. D; Raghuvanshi, U.; Agarwal, P.; Mathur, S.; Raghuvanshi, S. (2017). Identification of miRNA-mediated drought responsive multi-tiered regulatory network in drought tolerant rice, Nagina 22. *Scientific Reports*, 7, 15446. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15450-1>
- Bartlett, M. S. (1956). Deterministic and stochastic models for recurrent epidemics. In: *Proceedings of the Third Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, 4. California: University of California Press.

- Basmadjian, D.; Farnood, R. (2006). The Art of Modeling in Science and Engineering with Mathematics, (2). <https://doi.org/10.1201/9781482286038>.
- Bezerra, B. G.; Bezerra, J. R. C.; Silva, B. B.; Santos, C. A. C. (2015). Surface energy exchange and evapotranspiration from cotton crop under full irrigation conditions in the Rio Grande do Norte State, Brazilian Semi-Arid. *Bragantia*, 74(1), 120-128. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.0245>
- Bi, Y., Zhou, P., Li, S., Wei, Y., Xiong, X., Shi, Y., Liu, N., e Zhang, Y. (2019). Interspecific interactions contribute to higher forage yield and are affected by phosphorus application in a fully-mixed perennial legume and grass intercropping system. *Field Crops Research*, 244(December 2018), 107636. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107636>
- Boote, K. J.; Jones, J.; White, J. W.; Asseng, S. D.; Lizaso, J. I. (2013). Putting mechanisms into crop production models. *Plant, Cell and Environment*, 36,1658–1672. <https://doi.org/10.1111/pce.12119>
- Bouazzama, B.; Xanthoulis, D.; Bouaziz, A.; Ruelle, P.; Mailhol, J. (2012). Effect of water stress on growth, water consumption and yield of silage maize under flood irrigation in a semi-arid climate of Tadla (Morocco). *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*. 16(4), 468-477. <https://popups.uliege.be/1780-4507/index.php?id=9137>
- Bouras, E.; Jarlan, L.; Khabba, S.; Er-Raki, S.; Dezetter, A.; Sghir, F.; Trambly, Y. (2019). Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports*, 9(1), 19142. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55251-2>
- Briggs, L. J.; Shantz, H. L. (1913). “The water requirement of plants,”. *Bureau of Plant Industry Bulletin* (Washington, DC: US Department of Agriculture), 282–285, 1913.
- Bünemann, E. K.; Bongiorno, G.; Bai, Z.; Creamer, R. E.; Deyn, G.; Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- Cardoso, E. J. B. N.; Vasconcellos, R. L. F.; Bini, D.; Miyauchi, M. Y. H.; Santos, C. A. (2013). Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. *Scientia Agricola*, 70(4), 274-289. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
- Carson, J. S. (1986). Convincing Users of Model's Validity is Challenging Aspect of Modeler's Job. *Industrial Engineering*, 18(6), 74-85. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/268437.268448>
- Carvalho, P. C. F.; Barro, R. S.; Barth Neto, A.; Nunes, P. A. A.; Moraes, A. (2018). Integrating the pastoral component in agricultural systems. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 47, 1-14. <https://doi.org/10.1590/rbz4720170001>
- Carvalho, P. C. F.; Moraes, A.; Pontes, L. S.; Anghinoni, I.; Sulc, R. M.; Batello, C. (2014). Definições e terminologias para Sistema Integrado de Produção Agropecuária. *Revista Ciência Agronômica*, 45(5), 1040-1046. <https://www.scielo.br/pdf/rca/v45n5spe/20.pdf>
- Castro, F. C.; Santos, A. M. (2020). Salinidade do solo e risco de desertificação na região Semiárida. *Mercator (Fortaleza)*, 19, e190022020. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19002>
- Charney, J. G.; Quirk, W.J.; Chow, S.H.; Kornfield, J. (1977). A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 34(9), 1366-1385. [https://doi.org/10.1175/15200469\(1977\)034<1366:ACSOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200469(1977)034<1366:ACSOTE>2.0.CO;2)
- Chen, J.; Heiling, M.; Resch, C.; Mbaye, M.; Gruber, R., e Dercon, G. (2018). Agriculture, Ecosystems and Environment Does maize and legume crop residue mulch matter in soil organic carbon sequestration? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 265, 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.06.005>
- Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., HILL, J., Sommer, S., Von Maltitz, G. (Eds.), Atlas Mundial de Desertificação, Serviço de Publicação da União Europeia, Luxemburgo, (2018).

- Coblentz, W. K.; Akins, M. S.; Kalscheur, K. F.; Brink, G. E.; Cavadini, J. S. (2018). Effects of growth stage and growing degree day accumulations on triticale forages: 1. Dry matter yield, nutritive value, and in vitro dry matter disappearance. *Journal of Dairy Science*, 101(10), 8965-8985. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-14868>
- Conti, J. B. (2008). O conceito de desertificação. *Climatologia e estudos da paisagem*, 3(2), 39-52.
- Corrêa, S. T. R.; Lorençoni, R.; Dourado Neto, D.; Scarpore, F. V.; Vivian, R.; Ruiz, E. T. (2011). Aplicações e limitações da modelagem em agricultura – Revisão. *Revista de Agricultura*, 86(1), 1-13. http://www.fealq.org.br/ojs/index.php/revistadeagricultura/article/view/75/pdf_2789
- Costa, R. R. G.; Costa, K. A. P.; Souza, W. F.; Epifanio, P. S.; Santos, C. B.; Silva, J. T.; Oliveira, S. S. (2018). Production and quality of silages pearl millet and paiguas palisadegrass in monocropping and intercropping in different forage systems. *Bioscience Journal*, 34(2), 357-367. <https://doi.org/10.14393/BJ-v34n2a2018-33843>
- Davis, P. K. (1992). Generalizing Concepts and Methods of Verification, Validation, and Accreditation (VVeA) for Military Simulations. Santa Monica, CA: RAND Corporation. <https://www.rand.org/pubs/reports/R4249.html>
- Deng, M.; Xiang, G.; Yao, S. (2018). The effectiveness of the multilateral coalition to develop a green agricultural products market in China based on a TU Cooperative Game Analysis. *Sustainability*, 10(5), 1476-1492. <https://doi.org/10.3390/su10051476>
- 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>
- Dourado, C. S. (2017). Áreas de risco de desertificação: cenários atuais e futuros frente às mudanças climáticas. (2017). 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Dregne, H. E. Desertification of Arid Lands. (1986). *Physics of Desertification*, 4–34. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4388-9_2
- Dubey, S. K.; Sharma, S. (2018). Assessment of climate change impact on yield of major crops in the Banas River Basin, India. *Science of the Total Environment*, 635, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.343>
- Dwivedi, S.; Sahrawat, K.; Upadhyaya, H.; Ortiz, R. (2013). Chapter One - Food, Nutrition and Agrobiodiversity Under Global Climate Change. *Advances in Agronomy*, 120, 1-128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407686-0.00001-4>
- Ethier, M.; Bussière, B.; Broda, S.; Aubertin, M. (2018). Three-dimensional hydrogeological modeling to assess the elevated-water-table technique for controlling acid generation from an abandoned tailings site in Quebec, Canada. *Hydrogeology Journal*, 26(1), 1201-1219. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1713-y>
- Eyring, V.; Bony, S.; Meehl, G. A.; Senior, C. A.; Stevens, B.; Stouffer, R. J.; Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). The ethics of sustainable agricultural intensification. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/j0902e/j0902e00.pdf>>; acesso em 14 Abr 2020.
- Farias, I.; Lira, M. A.; Santos, D. C.; Tavares Filho, J. J.; Santos, M. V. F.; E Santos, V. F. (2000). Manejo de colheita e espaçamento da palma-forrageira, em consórcio com sorgo

- granífero, no Agreste de Pernambuco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(2), 341-347. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000200013>.
- Ferreira, M. P. S.; Artur, A. G.; Queiroz, H. M.; Romero, R. E.; Costa, M. C. G. (2018). Changes in attributes of soils subjected to fallow in desertification hotspot. *Revista Ciência Agronômica*, 49(1), 22-31. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180003>
- Fiorini, A.; Boselli, R.; Maris, S. C.; Santelli, S.; Perego, A.; Acutis, M.; Brenna, S.; Tabaglio, V. (2020). Soil type and cropping system as drivers of soil quality indicators response to no-till: A 7-year field study. *Applied Soil Ecology*, 55, 103646, 1036-1046. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103646>
- Fishman, R.; Devineni, N.; Raman, S. (2015). Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater?. *Environmental Research Letters*, 10(8), 1-9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084022>
- Fogarassy, C.; Nabradi, A. (2015). Proposals for low-carbon agriculture production strategies between 2020 and 2030 in Hungary. *Applied Studies in Agribusiness and Commerce*, 9(4), 5-16. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.226116>
- Fontoura Júnior, J. A. S.; Siewerdt, F.; Dionello, N. J. L.; Corrêa, M. N.; Silva, C. A. O. (2010). Verificação e calibração do modelo de simulação do desempenho reprodutivo de vacas de corte baseado no escore de condição corporal avaliação interna. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(12), 2769-2779. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001200030>.
- Fortini, R. M.; Braga, M. J.; Freitas, C. A. (2020). Impacto das práticas agrícolas conservacionistas na produtividade da terra e no lucro dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 58(2):e199479. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103646>
- Fung, K. M., Tai, A. P. K., Yong, T., Liu, X., e Lam, H. (2019). Co-benefits of intercropping as a sustainable farming method for safeguarding both food security and air quality. *Environmental Research Letters*, 14(4), 044011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafc8b>
- Gebru, H. (2015). A Review on the Comparative Advantages of Intercropping to Mono-Cropping System. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(9), 1–14.
- Geidam, K.; Sabo, R. (2014) The Impact of Desertification on Agriculture with Reference to Geidam, Nigeria. *Journal of Social Sciences and Humanities*, 1(4), 22 -34. https://www.academia.edu/9043066/The_Impact_of_Desertification_on_Agriculture_with_Reference_to_Geidam_Nigeria
- Ginkel, M.; Sayer, J.; Sinclair, F.; Aw-Hassan, A.; Craufurd, P. (2013). An integrated agro-ecosystem and livelihood systems approach for the poor and vulnerable in dry áreas. *Food Security*, 5(5), 751-767. <https://doi.org/10.1007/s12571-013-0305-5>
- Godfray, H. C.; Garnett, T. (2014). Food security and sustainable intensification. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 369, 1639. [/doi.org/10.1098/rstb.2012.0273](https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0273)
- Griffiths, B. S.; Faber, J.; Bloem, J. (2018). Applying soil health indicators to encourage sustainable soil use: The transition from scientific study to practical application. *Sustainability (Switzerland)*, 10(9), 3021. <https://doi.org/10.3390/su10093021>
- Grossi, M. C.; Justino, F.; Rodrigues, R. A.; Andrade, C. L. T. (2015). Sensitivity of the sorghum yield to individual changes in climate parameters: modelling based approach. *Bragantia*, 74(3), 341-349. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0411>
- Guimarães, M. J. M.; Simões, W. L.; Tabosa, J. N.; Santos, J. E.; Willadino, L. (2016). Cultivation of forage sorghum varieties irrigated with saline effluent from fish-farming under semiarid conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(5), 461-465. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p461-465>
- Guimarães, S. O.; Costa, A. A.; Vasconcelos Júnior, F. C.; Silva, E. M.; Sales, D. C.; Araújo Júnior, L. M.; Souza, S. G. (2016). Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste

- Brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(3), 337–365. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150150>
- Gurgel, A. C.; Laurenzana, R. D. Desafios e Oportunidades da Agricultura Brasileira de Baixo Carbono. Cap. 12 In: Agricultura, Transformação Produtiva e Sustentabilidade. Org(s): Vieira Filho, J. E. R.; Gasques, J. G. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea. BRASÍLIA, 2016.
- Gustafsson, L.; Sternad, M.; Gustafsson, E. (2017). The Full Potential of Continuous System Simulation Modelling. *Open Journal of Modelling and Simulation*, 5(4), 253-299. <https://doi.org/10.4236/ojmsi.2017.54019>
- Hao, M. H.; Zhang, J.; Meng, M.; Chen, H. Y. H.; Guo, X.; Liu, S.; Ye, L. (2019). Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests. *Scientific Reports*, 9, p.1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44921-w>.
- Harmanny, K. S.; Malek, Z. (2019). Adaptations in irrigated agriculture in the Mediterranean region: an overview and spatial analysis of implemented strategies. *Regional Environmental Change*, 19(4), 1401-1416. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01494-8>
- Hatfield, J. L.; Dold, C. (2019). Water-Use Efficiency: Advances and Challenges in a Changing Climate. *Frontiers in Plant Science*, 10(2), 103-112. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103>
- Hatfield, J. L.; Prueger, J. H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Hosseinalipour, S. M.; Abdolahi, E.; Razaghi, M. (2013). Static and Dynamic Mathematical Modeling of a Micro Gas Turbine. *Journal of Mechanics*, 29(2), 327-335. <https://doi.org/10.1017/jmech.2013.3>
- Huera-Lucero, T.; Labrador-Moreno, J.; Blanco-Salas, J.; Ruiz-Téllez, T. (2020). A framework to incorporate biological soil quality indicators into assessing the sustainability of territories in the ecuadorian amazon. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7), 3007. <https://doi.org/10.3390/su12073007>
- Hunter, M. C.; Smith, R. G.; Schipanski, M. E.; Atwood, L. W.; Mortensen, D. A. (2017). Agriculture in 2050: Recalibrating Targets for Sustainable Intensification. *BioScience*, 67(4), 368-391. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix010>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2018). Global Warming of 1.5 °C. 630p. < <https://www.ipcc.ch/sr15/>>. Acesso em:04 fev 2020.
- Irwin, M.; Wang, Z. (2017). Dynamic Systems Modeling. The International Encyclopedia of Communication Research Methods (eds J. Matthes, C.S. Davis and R.F. Potter), 2017. <https://doi.org/10.1002/9781118901731.iecrm0074>
- Jamala, G. Y.; Mada, D. A.; Abraham, P.; Joel, L. (2013). Socio-Economic impact of desertification on rural livelihood in Ganye southeastern Adamawa State, Nigeria. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 7(3), 26-31. <http://www.iosrjournals.org/iosr-jestft/papers/vol7-issue3/D0732631.pdf>
- Jordan, N. R.; Davis, A. S. (2015). Middle-Way Strategies for Sustainable Intensification of Agriculture. *BioScience*, 65(5), 513–519. <https://doi.org/10.1093/biosci/biv033>
- Kannan, N.; Anandhi, A. (2020). Water Management for Sustainable Food Production. *Water*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/w12030778>
- Kettenis, D. K. (1992). COSMOS: A simulation language for continuous, discrete and combined models. *Simulation*, 58(1), 32-41. <https://doi.org/10.1177/003754979205800106>
- Khusanbayevich, I. S.; Ugli, M. S. K.; Zaripovich, K. Z. 2020. Modeling the absorption of nutrients by the roots of plants growing in a salted soil. *Journal of critical reviews*, 7(6), 452-455. <http://dx.doi.org/10.31838/jcr.07.06.80>

- Kocur-Bera, K. (2019). Vulnerability of Rural Areas to Climate Change – Analysis of Similar Units in Terms of Spatial Conditions for Warmińsko-Mazurskie Voivodeship. *Journal of Ecological Engineering*, 20(6), 198–206. <https://doi.org/10.12911/22998993/109454>
- Koohafkan, P.; Altieri, M. A.; Gimenez, E. H. (2012). Green Agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 10(1), 61-75. <https://doi.org/10.1080/14735903.2011.610206>
- Kuyper, T. W.; Struik, P. C. (2014). Epilogue: global food security, rhetoric, and the sustainable intensification debate. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8(10), 71-79. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.09.004>
- Lambin, E. F. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 21(3). <https://doi.org/10.1177/030913339702100303>
- Law, A. (1991). Simulation model's level of detail determines effectiveness. *Industrial Engineering*, 23(10), 16-18.
- Li, P.; Shi, K.; Wanga, Y.; Konga, D.; Liua, T.; Jiaoa, J.; Liua, M. (2019). Soil quality assessment of wheat-maize cropping system with diferente productivities in China: Establishing a minimum data set. *Soil and Tillage Research*, 190(7), 31-40, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.019>
- Lima, L. R.; Silva, T. G. F.; Ferraz Jardim, A. M. R.; 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>
- Liu, L.; Basso, B. (2020). Linking field survey with crop modeling to forecast maize yield in smallholder farmers' fields in Tanzania. *Food Security*, 12, 537–548. <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01020-3>
- Liu, Y.; Hu, X.; Zhang, Q.; Zheng, M. (2017). Improving agricultural water use efficiency: a quantitative study of Zhangye city using the Static CGE model with a CES water land resources account. *Sustainability*, 9(2), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su9020308>
- Mancosu, N.; Snyder, R. L.; Kyriakakis, G.; Spano, D. (2015). Water Scarcity and Future Challenges for Food Production. *Water*, 7, 975-992. <https://doi.org/10.3390/w7030975>
- Marengo, J. A.; Cunha, A. P.; Alves, L. M. (2016). A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Climanálise*, 3(1), 1-6. <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/marengoetal.pdf>
- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 1997 winter simulation conference proceedings. ed. J.A. Joines, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick, p. 7-13, IEEE, Piscataway, NJ.
- Mcbride, L. A., Hope, A. P., Canty, T. P., Bennett, B. F., Tribett, W. R., e Ross, J. (2020). Comparison of CMIP6 Historical Climate Simulations and Future Projected Warming to an *Empirical Model of Global Climate*. September, 1–59.
- Mila, A. J.; Ali, H.; Akanda, A. R.; Rashid, H. O.; Rahman, A. (2017). Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic return of sunflower. *Cogent Food e Agriculture*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/23311932.2017.1287619>
- Mkhabela, M. S.; Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*. 110, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>
- Morrison, K. D.; Kolden, C. A. (2015). Modeling the impacts of wildfire on runoff and pollutant transport from coastal watersheds to the nearshore environment. *Journal of Environmental Management*, 151, 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.025>
- Nawaz, A.; Farooq, M.; Lal, R.; Rehman, A.; Hussain, T.; Nadeem, A. (2017). influence of sesbania brown manuring and rice residue mulch on soil health, weeds and system

- productivity of conservation rice – wheat systems. *Land Degradation e Development*, 28, 1078–1090. <https://doi.org/10.1002/ldr.2578>
- Nawaz, M. F.; Bourrié, G.; Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Nikulina, T. N.; Zhirnova, I. S.; Stupina, A. A. Zhirnov, A. A. (2019). Mathematical modeling of economic processes in complex systems (on the example of Krasnoyarsk municipality). *Journal of Physics: Conference Series*, 1353. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012118>
- Nunes, H. G. C. C.; Sousa, D. P.; Moura, V. B.; Ferreira, D. P.; Nóvoa Pinto, J. V.; Vieira, I. G. O Souza, P. J. O. P. (2019). Performance of the AquaCrop model in the climate risk analysis and yield prediction of cowpea (*Vigna Unguiculatta L. Walp*). *Australian Journal of Crop Science*, 13(7), 1105–1112. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1590>
- Ochieng, J.; Kirimi, L.; Mathenge, M. (2016). Effects of climate variability and change on agricultural production: The case of small scale farmers in Kenya. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 77, p.71–78. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.005>
- Oliveira Filho, F. A., Thiago, F.; Bezerra, C.; Sandro, A. (2016). Eficiência agrônômica e biológica nos consórcios da mamoneira com feijão-caupi ou milho. *Revista Ciência Agronômica*, 47(4), 729–736. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160087>
- Oyama, M. D.; Nobre, C.A. (2004). Climatic consequences of a large-scale desertification in northeast Brazil: A GCM simulation study. *Journal of Climate*, 17(16), 3203–3213. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3203:CCOALD>2.0.CO;2)
- Paltasingh, K. R.; Goyari, P.; Mishra, R. K. (2012). Measuring Weather Impact on Crop Yield Using Aridity Index: Evidence from Odisha. *Agricultural Economics Research Review*, 25(2), 205–216. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.137373>
- Pan Brasil. Programa de ação nacional de combate à desertificação e mitigação dos efeitos da seca. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos hídricos, 2004.
- Pareek, A.; Dhankher, O. P.; Foyer, C. H. (2020). Mitigating the impact of climate change on plant productivity and ecosystem sustainability. *Journal of Experimental Botany*, 71(2), 451–456. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz518>
- Parker, L.; Bourgoin, C.; Martinez-Valle, A.; Läderach, P. (2019). Vulnerability of the agricultural sector to climate change: The development of a pan-tropical Climate Risk Vulnerability Assessment to inform sub-national decision making. *PLOS ONE*, 14(3), e0213641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213641>
- Powell, J.; Reinhard, S. (2016). Measuring the effects of extreme weather events on yields. *Weather and Climate Extremes*, 12, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2016.02.003>
- Pretty, J.; Bharucha, Z. P. (2014). Sustainable intensification in agricultural systems. *Annals of Botany*, 114(8), 1571–1596. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu205>
- Queiroz, M. G.; Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S.; Souza, C. A. A.; Carvalho, H. F. S. (2016). Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. *Irriga*, 1(1), 141–154. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- Ran, H.; Kang, S.; Li, F.; Du, T.; Tong, L.; Li, S.; Ding, R.; Zhang, X. (2018). Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 203, 438–450. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.030>
- Refeldt, M. J. H. (2009). A aplicação de modelos matemáticos em situações-problemas empresariais, com uso do software LINDO. 299f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Informática na Educação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2009.

- Renato, N. S.; Sediya, G. C.; Silva, J. B. L.; Pereira, E. G. (2018). Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO₂ elevados. *Revista de Ciências Agrárias*, 41, (4), 1067-1074. <http://dx.doi.org/10.19084/RCA18047>
- Rivett, P. (1980). Model building for decision analysis. New York: J. Wiley, 1980.
- Robinson, S. (1997). Simulation Model Verification and Validation: Increasing the Users confidence. *Winter Simulation Conference*, 53-57. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/268437.268448>
- Rodrigues, T. M. F.; Senna, M. C. A.; Cataldi, M. (2019). Simulação dos impactos climáticos da desertificação do Nordeste brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 24(5), 1037-1047. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522019164751>
- Rosa, S. L. K.; Souza, J. L. M.; Tsukahara, R. Y. (2020). Performance of the AquaCrop model for the wheat crop in the subtropical zone in Southern Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 55. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.01238>
- Rosenzweig, C.; Elliott, J.; Deryng, D.; Ruane, A. C.; Müller, C. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *PNAS*, 111(9), 3268-3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Safiullin, N. Z.; Safiullin, B. L. (2018). Static and dynamic models in economics. *Journal of Physics: conference series*, 1015(3). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032117>
- Sambuichi, R. H. R.; Oliveira, M. A. C.; Silva, A. P. M.; Luedemann, G. (2012). A sustentabilidade ambiental da agropecuária brasileira: impactos, políticas públicas e desafios. Texto para Discussão, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).
- Schlöter, M.; Nannipieri, P.; Sørensen, S. J.; Elsas, J. D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 54(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>
- Shargui, Y.; Kochak, M.; Adeli, S. (2014). The effects of different soil irrigation on yield and its related traits in spring safflower cultivars in Iran. *Advances in Environmental Biology*, 8(9), 898-901.
- Sharma, A.; Rana, C.; Singh, S.; Katoch, V. (2016). Soil salinity: causes, effects and management y cucurbits, in: PESSARAKLI, M. (Ed.), Hand - book of Cucurbits: Growth, Cultural Practices and Physiology. Taylor e Francis Group, New York, 419–440.
- Shinozaki, K.; Uemura, M.; Bailey-Serres, J.; Bray, E. A.; Weretilny, E. (2015). Responses to Abiotic Stress Cap. 22. In: BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L, Ed(s). Biochemistry e Molecular Biology of Plants, Wiley-Blackwell; 2, 711-767.
- Silva, V. F.; Bezerra, C. V. C.; Nascimento, E. C. S.; Ferreira, T. N. F.; Lima, V. L. A.; Andrade, L. O. (2019). Production of chili pepper under organic fertilization and irrigation with treated wastewater. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(2), 84-89. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p84-89>
- Soares, D. B.; Mota Filho, F. O.; Nóbrega, R. S. (2011). Sobre o Processo de Desertificação. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 4(1), 174-188. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v4i1.232699>
- Sodré, U. (2007). Modelos Matemáticos. Departamento de Matemática da Universidade Estadual de Londrina. Londrina-PR, 2007. SODRÉ, U. Modelos Matemáticos - UEL, 27p.
- Souza, D. C. F.; Lima, I. S.; Santana, J. A.; Almeida, A. Q.; Gonzaga, M. I. S.; Santana, J. F. (2018). Zoneamento agroclimático da palma forrageira (opuntia sp.) para o estado de Sergipe. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 12(1), 2338-2347. <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n100715>
- 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>

- Stefanoski, D. C.; Santos, G. G.; Marchão, R. L.; Petter, F. A.; Pacheco, L. P. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1301–1309. <https://doi.org/10.1590/S141543662013001200008>
- Struik, P. C.; Kuyper, T. W. (2017). Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(8), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0445-7>
- Sud, Y.C.; Molod, A. (1988). A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface-albedo anomalies on July circulation and rainfall. *Monthly Weather Review*, 116(11), 2388-2400. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116%3C2388:AGSSOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116%3C2388:AGSSOT%3E2.0.CO;2)
- Sultan, B.; Guan, K.; Kouressy, M.; Biasutti, M.; Piani, C.; Hammer, G. L.; Mclean, G.; Lobell, D. B. (2014). Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environmental Research Letters*, 9(10), 104006. <https://doi.org/10.1088/17489326/9/10/104006>
- Sun, S.; Liu, J.; Wu, P.; Wang, Y.; Zhao, X.; Zhang, X. (2016). Comprehensive evaluation of water use in agricultural production: a case study in Hetao Irrigation District, China. *Journal of Cleaner Production*, 112(5), 4569-4575. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.123>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.; Murphy, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017, 888 p.
- Tang, Z.; An, H.; Deng, L.; Wang, Y.; Zhu, G.; Shangguan, Z. (2016). Effect of desertification on productivity in a desert steppe. *Scientific Reports*, 6(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/srep27839>
- Taylor, K. E.; Stouffer, R. J.; Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, 93, 485- 498, 2012. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *PNAS*, 108(50), 260-264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Tucci, C. E. M. (2005). Modelos Hidrológicos. 2 ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Brasil.
- Tuğrul, M. K. (2020). Soil Management in Sustainable Agriculture. *Sustainable Crop Production*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88319>
- Turban, E.; Wetherbe, J.; McLean, E. (2004). Tecnologia da informação para gestão. Porto Alegre. Editora:Bookman, 1ª edição, 660p.
- UNFPA – UNITED NATIONS POPULATION FUND. (2011). Relatório sobre a situação da população mundial. Nova York: Fundo de População das Nações Unidas.
- Verstraete, M. M.; Schwartz, S. A. (1991). Vegetation and Climate Interactions in Semi-arid Regions. *Vegetatio*, 91(1), 3-13.
- Viola, E.; Franchini, M. (2012). Os limiares planetários, a Rio+20 e o papel do Brasil. *Cadernos EBAPE.BR*, 10(3), 470-491. <https://doi.org/10.1590/S1679-39512012000300002>
- Wang, Q.; Huo, Z.; Zhang, L.; Wang, J.; Zhao, Y. (2016). Impact of saline water irrigation on water use efficiency and soil salt accumulation for spring maize in arid regions of China. *Agricultural Water Management*, 163, 125-138. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.09.012>
- Wang, Q.; Zhang, D.; Zhou, X.; Liu, J.; Liu, Q.; Li, X.; Sample, D. J. (2019). Comparing yield, quality, water use efficiency, and value between fodder and grain produced using ridge-furrow rainwater harvesting in a semiarid region. *Crop Science*, 59(5), 2214-2226. <https://doi.org/10.2135/cropsci2019.03.0180>

- Wijitkosum, S. (2016). The impact of land use and spatial changes on desertification risk in degraded areas in Thailand. *Sustainable Environment Research*, 26(2), 84-92. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.11.004>
- Willey, R. W.; Rao, M. R. A. (1980). Competitive ratio for quantifying competition between intercrops. *Experimental Agriculture*, 16(2), 117-125. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010802>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin - American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/15200477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Yin, W.; Chai, Q.; Zhao, C.; Yu, A.; Fan, Z.; Hu, F.; Coulter, J. A. (2020a). Water utilization in intercropping: A review. *Agricultural Water Management*, 241, 2020a. 106335. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>
- Yin, W.; Yu, A.; Guo, Y.; Wang, Y.; Zhao, C.; Fan, Z.; Hu, F.; Chai, O. (2020b). Straw retention and plastic mulching enhance water use via synergistic regulation of water competition and compensation in wheat-maize intercropping systems. *Field Crops Research*, 229, 78-94. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.003>
- Zadoks, J. C.; Rabbinge, R. (1985). Modelling to a purpose. In: C.A. GILLIGAN, Ed., *Advances in Plant Pathology, Mathematical Modelling of Crop Disease*, Academic Press, London, 3, 231–244.
- Zhang, P.; Wei, T.; Han, Q.; Ren, X., Jia, Z. (2020). Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China. *Agricultural Water Management*, 241, 106382. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106382>

CAPÍTULO II

CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO AQUACROP-FAO PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO AQUACROP-FAO PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

RESUMO

Modelos de simulação de culturas servem para estimar a resposta das plantas frente às interações com os fatores edafoclimáticos, logo contribuem para o desenvolvimento de estratégias de manejo e com as previsões de rendimento das culturas. Objetivou-se calibrar e avaliar o modelo AquaCrop (FAO) para a palma forrageira clone Orelha de Elefante Mexicana conduzida sob distintos sistemas de cultivo no Semiárido do Brasil. Para isso, cinco experimentos irrigados foram conduzidos no “Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e outras Plantas Forrageiras”, na Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, município de Serra Talhada PE. Todos os experimentos foram com base no delineamento em blocos casualizados, com 4 repetições, conduzidos dentro do período de julho de 2018 a agosto de 2020. Experimento 1: palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos (0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m) entre plantas, com espaçamento fixo de 1,00m entre fileiras; Experimento 2: palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos (0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m) entre plantas, com espaçamento fixo de 1,25m entre fileiras; Experimento 3: palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas (1,00; 1,25; 1,50 e 1,75 m) de cultivo e consorciada com sorgo; Experimento 4: Palma forrageira conduzida sob aplicação de cobertura morta no solo (0; 5; 10 e 15 ton ha⁻¹); Experimento 5: palma forrageira submetida a adubação (50; 150; 300 e 450 kg ha⁻¹) com ureia. Os experimentos foram conduzidos dentro do período de julho de 2018 a agosto de 2020. O modelo AquaCrop foi avaliado para prever a produtividade de forragem em diferentes sistemas. Para os processos de calibração e validação do modelo utilizou-se a média das informações de cultura de dois blocos, distintos para cada processo, isto é, os blocos utilizados na calibração não foram inseridos no processo de validação. O desempenho do modelo foi avaliado pelos parâmetros: raiz relativa do erro quadrado médio (RMSE) e RMSE normalizado (NRMSE); coeficiente de determinação (R²); coeficiente de eficiência de modelagem (EM); e índice de concordância de Willmot (d). Os parâmetros estatísticos obtidos na calibração apontaram bom desempenho do modelo para AquaCrop para estimar a biomassa seca, com $10 < \text{NRMSE} < 20$; $R^2 > 0,96$ e $\text{EM} > 0,95$ para a maioria dos tratamentos. Os sistemas com adubação com ureia apresentaram valores ligeiramente melhores no processo de calibração em relação aos demais sistemas. Entre os sistemas consorciados os arranjos 0,10 x 1,00 e 0,10 x 1,25 apresentaram os maiores valores de biomassa simulada.

Palavras-chave: *Opuntia stricta*., modelagem matemática, técnicas hídricas, resiliência agrícola.

CALIBRATION AND EVALUATION OF AQUACROP-FAO FOR FORAGE PRODUCTION SYSTEMS IN SEMI-ARID BRAZIL

ABSTRACT

Crop simulation models are used to estimate the response of plants to interactions with soil and climate factors, thus contributing to the development of management strategies and crop yield forecasts. The objective was to calibrate and evaluate the AquaCrop model (FAO) for the Mexican forage palm clone Orelha de Elefante Mexicana under different cropping systems in the semiarid region of Brazil. For this, five irrigated experiments were conducted in the "International Reference Center for Agro-meteorological Studies of Oil Palm and other Forage Plants", at the Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, municipality of Serra Talhada PE. All experiments were based on randomized block design with 4 repetitions, conducted within the period July 2018 to August 2020. Experiment 1: forage palm intercropped with sorghum and subjected to plant spacing (0.10; 0.20; 0.30; 0.40 and 0.50 m) with fixed spacing of 1.00 m between rows; Experiment 2: forage palm intercropped with sorghum and subjected to plant spacing (0.10; 0.20; 0.30; 0.40 and 0.50 m) with fixed spacing of 1.25 m between rows; Experiment 3: Forage palm under different inter-row spacing (1.00; 1.25; 1.50 and 1.75 m) of crop and intercropped with sorghum; Experiment 4: Forage palm conducted under soil mulch application (0; 5; 10 and 15 ton ha⁻¹); Experiment 5: Forage palm subjected to fertilization (50; 150; 300 and 450 kg ha⁻¹) with urea. The experiments were conducted within the period July 2018 to August 2020. The AquaCrop model was evaluated to predict forage productivity in different systems. For the model calibration and validation processes the average of the crop information from two blocks, distinct for each process, was used, i.e. the blocks used in calibration were not inserted in the validation process. The model performance was evaluated by the parameters: relative root mean square error (RMSE) and normalized RMSE (NRMSE); coefficient of determination (R²); modeling efficiency coefficient (ME); and Willmot's agreement index (d). The statistical parameters obtained from the calibration indicated good model performance for AquaCrop to estimate dry biomass, with $10 < \text{NRMSE} < 20$; $R^2 > 0.96$ and $\text{EM} > 0.95$ for most treatments. The systems with urea fertilization showed slightly better values in the calibration process compared to the other systems. Among the intercropped systems the 0.10 x 1.00 and 0.10 x 1.25 arrangements presented the highest values of simulated biomass.

Keywords: *Opuntia stricta*,, modelling, water technology, agricultural resilience.

1. INTRODUÇÃO

Modelos de simulação de culturas agrícolas buscam, com precisão aceitável, inferir sobre as respostas das plantas às interações com os fatores edafoclimáticos e, assim, estimar parâmetros relacionados ao crescimento e à produção (Adeboye et al., 2019). Nesse contexto, modelos de simulação são ferramentas que podem contribuir com o desenvolvimento de estratégias de manejo das culturas; as previsões de safras; o zoneamento agroclimático; o monitoramento de colheita e a análise dos impactos de projeções do clima sobre a agricultura (Saad et al., 2014 ; García et al., 2014; Dubey e Sharma, 2018; Pirmoradian e Davatgar, 2019).

Em que pese a importância dos modelos de simulação de culturas no sentido de permitir explorar diferentes contextos ambientais, sua aplicação exige os procedimentos de calibração e validação (ou avaliação) para as condições edafoclimáticas peculiares de cada local ou da região em que se deseja aplicá-lo (Liu et al., 2015). Nesse sentido, o processo de calibração consiste no ajuste dos coeficientes que caracterizam a fenologia da espécie e fatores relacionados ao seu crescimento e produtividade, de forma que os valores simulados sejam o mais próximo possível dos valores observados (Steduto et al., 2009). Em outras palavras, a calibração envolve a estimativa e/ou ajuste de parâmetros chave do modelo, de forma a minimizar o erro entre os dados reais e os simulados (Rackl e Hanley, 2017).

O processo de validação, por sua vez, consiste em aplicar critérios estatísticos para verificar o desempenho e a precisão do modelo no que diz respeito aos seus dados simulados, ou seja, após a calibração busca-se verificar se suas estimativas sobre o sistema real estão corretas para algum nível de confiança aceitável, utilizando dados independentes dos aplicados na calibração do modelo. Uma vez validado, o modelo matemático pode ser utilizado para explorar e inferir sobre o rendimento do sistema de produção em outros contextos ambientais e climáticos, bem como simular as melhores estratégias de manejo (Tavakoli et al., 2015; Bello e Walker, 2017; Nyathi et al., 2018; Nunes et al., 2019).

Nesse contexto, no âmbito da modelagem de culturas agrícolas, um dos principais modelos é o AquaCrop. Trata-se de um software gratuito desenvolvido em 2009 pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Esse modelo de simulação foi projetado para auxiliar a gestão e a produção agrícola no que tange ao efeito da água. Nesse quesito, o AquaCrop possibilita uma modelagem do crescimento e rendimento das culturas agrícolas em função da cobertura do dossel ao adotar a água como um fator limitante, e assim simula a produtividade real e a produtividade da água, além de poder inferir sobre o potencial de rendimento de um sistema de produção agrícola (Akumaga et al., 2017).

Além do AquaCrop, vários modelos de simulação de culturas como CERES (Andrade et al., 2016), CSM-CROPGRO (Malik et al., 2018) e APSIM (Watt et al., 2022) podem ser adotados para explorar diferentes manejos ambientais para a produção de forragens. Apesar disso, grande parte dos modelos de simulação de culturas são complexos e, portanto, raramente utilizados por agricultores, extensionistas e planejadores (Raes et al., 2012). Além do mais, o uso desses modelos mais complexos requer um grande número de variáveis e parâmetros de entrada que nem sempre estão prontamente disponíveis para a variedade de culturas e locais ao redor do mundo.

Estudos visando a calibração, validação e entendimento das práticas de manejo nas simulações de produtividade de diversas culturas com o AquaCrop já foram realizados em diversos locais do mundo (Bello e Walker, 2017; Nyathi et al., 2018; Rashid et al., 2019; Chibarabada et al., 2020). Porém, apesar de diversos trabalhos com o AquaCrop ou outros modelos no estudo de plantas forrageiras em condições semiáridas ao longo do globo (Abedinpour et al., 2012; Akumaga et al., 2017; Pirmoradian e Davatgar, 2019), ainda não há conhecimento de estudos publicados em que se buscou explorá-lo nas condições semiáridas do Brasil para a palma forrageira [*Opuntia stricta* (Haw.)], seja em condições de cultivo exclusivo, seja no sistema consorciado com a cultura do sorgo.

O sistema de cultivo consorciado é uma prática que mostra bons desempenhos no quesito aproveitamento de água em regiões semiáridas. Além disso, o consórcio palma-sorgo se mostra como uma importante alternativa, pois muitas vezes proporciona índices produtivos superiores ao cultivo exclusivo destas espécies (Diniz et al., 2017). Os bons desempenhos produtivos obtidos nesse tipo de consórcio pode ser justificado pelas características metabólicas de ambas as espécies (Santos et al., 2020; Jardim et al., 2022). A palma forrageira é uma planta xerófila, se adapta muito bem às condições áridas e semiáridas, sendo essa cultura considerada uma importante espécie para implementação de sistemas de produção de forragem hidricamente eficientes (Diniz et al., 2017; Lima et al., 2018). Ela possui seu metabolismo fotossintético do tipo CAM (Crassulasean Acid Metabolism), caracterizado pela assimilação noturna do CO₂. O sorgo, por sua vez, é uma planta de metabolismo C₄, ou seja, realiza a assimilação de CO₂ no período diurno, todavia tem a característica fisiológica de interromper ou limitar a atividade metabólica sob déficit hídrico (Santos et al., 2020).

Diante disso, objetivou-se calibrar e validar o AquaCrop para sistemas de produção de forragem, envolvendo a cultura da palma forrageira e do sorgo, nas condições de Serra Talhada, estado de Pernambuco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL

Os experimentos, dos quais foram obtidos os indicadores agrometeorológicos para entrada no modelo AquaCrop-FAO, foram conduzidos no “Centro de Referência Internacional de Estudos em Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras” (CentroRef), localizado na Unidade Acadêmica de Serra Talhada/Universidade Federal Rural de Pernambuco (7°56'20”S; 38°17'31”O e 499 m), município de Serra Talhada, estado de Pernambuco (Figura 1).

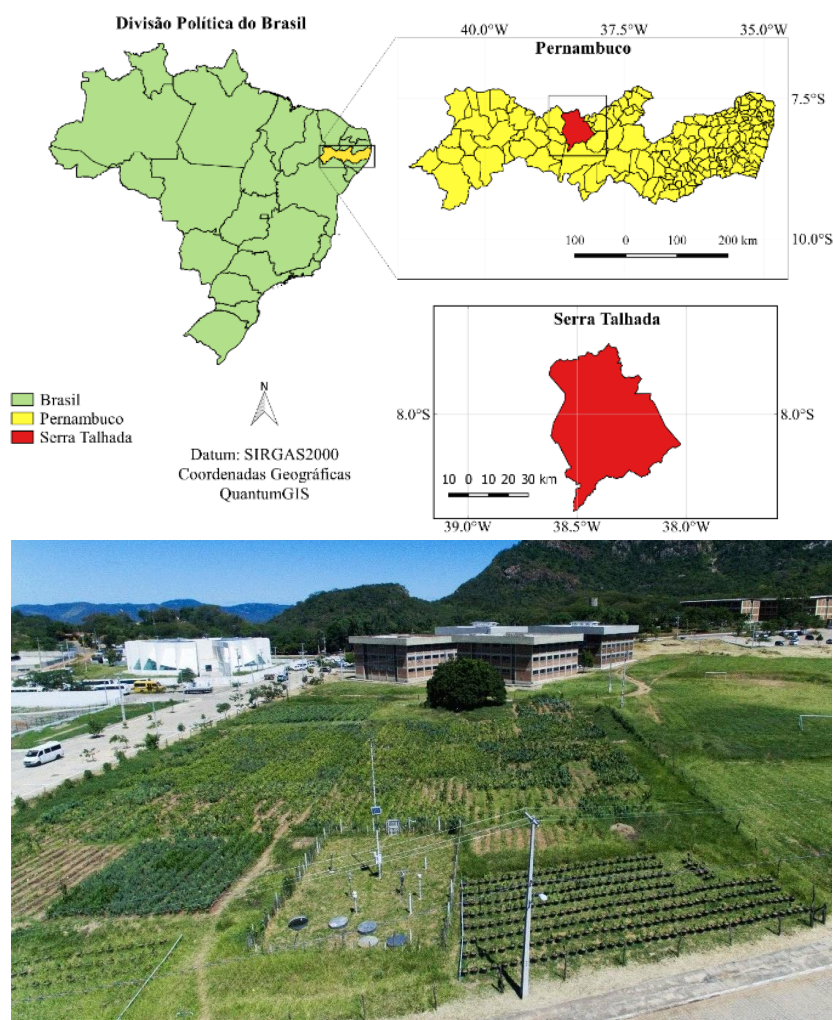


Figura 1. Localização do município de Serra Talhada e vista dos experimentos com plantas forrageiras conduzidos no CentroRef, em Serra Talhada-PE.

Segundo a classificação de Köppen, o clima de Serra Talhada é do tipo BSw_h, semiárido, com incidência de chuva nos meses mais quentes, e estiagem nos meses frios do ano (Álvares et al., 2013) com temperaturas mínima e máxima do ar de 20,1 e 32,9 °C,

respectivamente. A umidade relativa média do ar de 63%, precipitação pluvial média de 642 mm ano⁻¹, e demanda atmosférica superior a 1.800 mm ano⁻¹ (Figura 2).

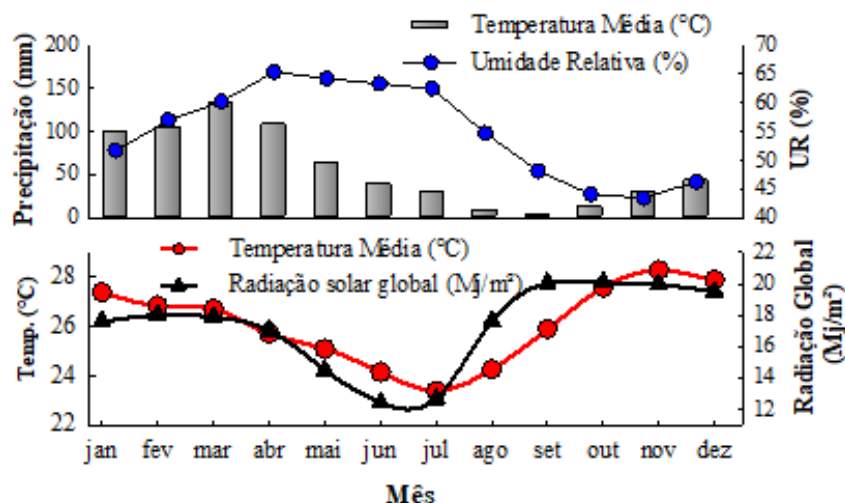


Figura 2. Condições meteorológicas médias (2011 – 2020) do município de Serra Talhada-PE. Fonte: INMET

O solo do campo experimental desse estudo é do tipo Cambissolo Háplico Ta Eutrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solos (Santos et al., 2018). Análises química e física das camadas de 0 a 70 cm foram obtidas como parte deste trabalho (Tabela 1).

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo coletado na área experimental da UFRPE/Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), experimentos com palma forrageira.

Descrição		Camada (cm)						
		0-10 cm	10-20 cm	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
Cálcio (Ca)	(cmolc/dm ³)	3,20	3,70	3,00	2,80	2,70	2,80	3,50
Magnésio (Mg)		1,90	1,90	1,80	1,70	1,80	1,90	2,10
Sódio (Na)		1,04	1,14	1,27	1,66	1,77	1,54	1,27
Potássio (K)		15,59	12,01	13,04	10,66	9,19	7,70	6,86
(H+Al)		0,70	0,50	0,20	0,20	0,50	0,20	0,50
Soma de bases (S)		21,70	18,80	19,10	16,80	15,50	13,90	13,70
Cap. de Troca de Cátions (CTC)		22,50	19,20	19,40	17,10	15,90	14,20	14,20
Cobre (Cu)	mg/dm ³	0,43	0,93	-0,12	0,28	0,40	0,22	0,61
Manganês (Mn)		19,40	15,00	12,00	9,60	9,40	7,10	7,50
Ferro (Fe)		26,00	25,80	34,50	27,40	29,90	26,70	26,50
Zinco (Zn)		0,96	2,29	0,08	0,29	0,15	0,36	0,56
Fósforo(P)		185,35	152,57	191,63	116,56	122,83	129,10	113,93
Sat. de bases (V)	(%)	96,80	97,50	98,80	98,60	97,00	98,30	96,60
pH em água (1:2,5)		5,90	6,00	6,20	6,30	6,40	6,40	6,20
Condutividade Hidráulica (Ks)	kg mm/d	42,73	38,80	52,04	33,95	29,04	33,67	31,50
Densidade do solo	kg/d	1,58	1,60	1,55	1,57	1,54	1,53	1,54
Porosidade total	(%)	34,80	36,71	37,28	35,82	37,72	38,39	38,24
Areia		80,0%	79,6%	79,3%	78,7%	77,8%	76,4%	28,9%
Silte	(%)	15,4%	14,3%	13,1%	15,3%	15,0%	15,0%	59,8%
Argila		4,6%	6,1%	7,6%	6,0%	7,2%	8,6%	11,3%

2.2 ARRANJO EXPERIMENTAL E PRÁTICAS CULTURAIS

O campo experimental foi dividido em cinco, nos quais se buscou testar diferentes sistemas de cultivos hidricamente eficientes para a produção de forragem. O principal material vegetal adotado foi o clone de palma forrageira “Orelha de Elefante Mexicana (OEM)” — *Opuntia stricta* (Haw.). Também foi utilizado o sorgo (*Sorghum bicolor*), cultivar IPA-467, nos experimentos em que o clone OEM foi submetido ao sistema de cultivo consorciado. Todos os experimentos foram dispostos em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, seguindo o modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + b_j + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (1),$$

em que: Y_{ij} representa as variáveis dependentes; μ , a média geral das observações; b_j , o efeito do bloco; τ_i , o efeito dos tratamentos utilizados e, ε_{ij} o erro residual aleatório. Cada bloco foi composto por quatro fileiras de cultivo.

Na ocasião do plantio, para todas as áreas experimentais, houve preparo do solo com aração, gradagem e sulcagem. Ademais, todos os experimentos foram conduzidos sob irrigação. O sistema de irrigação utilizado foi o de gotejamento, com emissores espaçados em 0,3 m, com vazão média de $1,56 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$ e coeficiente de uniformização de 93,6%. A mangueira gotejadora foi disposta adjacente às fileiras de cultivo. A irrigação das áreas foi feita três vezes por semana (segunda, quarta e sexta), com base em 80% da evapotranspiração da cultura (ET_c) e coeficiente de cultura de 0,52 (kc) da palma forrageira (Queiroz et al., 2018), sendo a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada conforme o método de Permain-Mointh (Allen, 2006). A água utilizada no experimento foi proveniente de um poço artesiano próximo ao campo experimental, cuja condutividade elétrica era de $1,62 \text{ dS m}^{-1}$, com pH de 6,84 e concentração de sódio e potássio de $168,66 \text{ mg L}^{-1}$ e $28,17 \text{ mg L}^{-1}$, classificada como C3 (alta salinidade) conforme McGeorge (1954).

Tratos culturais, como limpeza de ervas daninhas e eventual controle de pragas, foram realizados. A adubação das áreas seguiu o Manual de Recomendação de Adubação para o estado Pernambuco, do Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA (Cavalcanti, 2008).

2.2.1 Experimento 1 — palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,00m entre fileiras

O experimento se iniciou com o plantio do clone aos vinte e sete dias do mês de agosto de 2018. A cultura foi submetida a diferentes espaçamentos entre plantas, isto é, 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m, com espaçamento fixo de 1,00 m entre linhas, resultando nas densidades: 100.000; 50.000; 33.333; 25000 e 20.000 plantas ha^{-1} , respectivamente. Aos 169 dias após o plantio (DAP) da palma, foi semeado o sorgo IPA-467, cujo semeio se deu a 0,20 metros das linhas de cultivo da palma e mantendo-se 20 plantas por metro linear (densidade equivalente de 200.000 plantas ha^{-1}).

Durante o ciclo experimental da palma foi determinada sua biomassa aos 184, 273, 365 e 457 DAP, e biometria aos 0; 176; 205; 241; 266; 304; 332; 365 e 393 DAP. O ciclo do sorgo teve duração de 106 dias, cujas biometrias e biomassas ao longo do ciclo foram para 9; 23; 37; 51; 65; 79; 93 e 106 dias após semeadura (DAS).

2.2.2 Experimento 2 — palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,25m entre fileiras

O experimento se iniciou com o plantio da palma no dia 27 de agosto de 2018. A cultura foi submetida a diferentes espaçamentos entre plantas, a saber, 0,10; 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m, com espaçamento fixo de 1,25 m entre linhas, resultando nas densidades: 80.000; 40.000; 26.666; 20.000 e 16.000 plantas ha^{-1} , respectivamente. Aos 169 DAP da palma, foi semeado o sorgo IPA-467, cujo semeio se deu a 0,20 m das linhas de cultivo da palma e mantendo-se 20 plantas por metro linear (densidade de 160.000 plantas ha^{-1}). Durante o ciclo experimental da palma foi determinada sua biomassa aos 184; 273; 365 e 457 DAP, e biometria aos 0; 176; 205; 241; 266; 304; 332; 365 e 393 DAP. O ciclo do sorgo teve duração de 106 dias, cujas biometrias e biomassas ao longo do ciclo foram para 9; 23; 37; 51; 65; 79; 93 e 106 DAS.

2.2.3 Experimento 3 — palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo e consorciada com sorgo

O experimento se iniciou com o plantio do clone de palma no dia 27 de agosto de 2018. O clone foi submetido a diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo, isto é: 1,00 m; 1,25 m; 1,50 m e 1,75 m, com espaçamento fixo de 0,20 m entre plantas, resultando nas densidades

50.000; 40.000; 33.333 e 28.571, respectivamente. Aos 169 dias após o plantio da palma, foi semeado o sorgo IPA-467, cujo semeio se deu a 0,20 metros das linhas de cultivo da palma e deixando 20 plantas por metro linear, resultando nas densidades de 200.000; 160.000; 133.000 e 114.000 plantas ha⁻¹.

Durante o ciclo experimental da palma foi determinada sua biomassa aos 184, 273, 365 e 457 dias após plantio (DAP), e sua biometria aos 0; 176; 205; 241; 266; 304; 332; 365 e 393 DAP. O ciclo do sorgo teve duração de 106 dias, cujas biometrias e biomassas ao longo do ciclo foram para 9; 23; 37; 51; 65; 79; 93 e 106 dias após semeadura (DAS).

2.2.4 Experimento 4 — palma forrageira sob níveis de cobertura morta

A área com a cultura foi implementada em 07 de julho de 2018, com o plantio seguindo o espaçamento entre plantas de 1,00 m x 0,20 m (50.000 plantas ha⁻¹). O início do ciclo experimental se deu em 09 de agosto de 2019, quando foi feito um corte de uniformização, deixando apenas os cladódios basais e os de primeira ordem, e finalizou dia 08 de agosto de 2020. Os tratamentos, aplicados cinco dias após o início do ciclo experimental, consistiram em quatro níveis de cobertura do solo: 0; 5; 10 e 15 ton ha⁻¹. A cobertura morta foi composta de *Urochloa mosambicensis* (“capim-corrente”), aplicada uma única vez. Ao longo do ciclo foram determinadas nove biometrias (1; 48; 77; 109; 131; 168; 214; 274 e 364 dias após corte- DAC) e cinco biomassas (3; 119; 224; 273 e 364 DAC).

2.2.5 Experimento 5 — palma forrageira submetida a adubação com ureia

O experimento se iniciou com o plantio do clone OEM no dia 28 de janeiro de 2019. A cultura foi submetida a quatro níveis de adubação com ureia, a saber: 50; 150; 300 e 450 kg ha⁻¹. Os tratamentos foram aplicados 32 DAP. O clone de palma foi conduzido no espaçamento 1,25 m x 0,20 m (40.000 plantas ha⁻¹). Durante o ciclo experimental do clone foi determinada a sua biomassa aos 0; 59; 151; 241 e 337 DAP, e biometria aos 0; 46; 86; 109; 142; 172; 261; 296; 318; 357 e 386 DAP.

2.3 MODELO AQUACROP E SEUS PARÂMETROS DE ENTRADA

Foi utilizado o modelo AquaCrop versão 6.1. Conforme abordado no capítulo 1 (seção 2.6), o modelo AquaCrop usa entradas separadas de componentes climáticos (chuva,

evapotranspiração e temperaturas máximas e mínima); parâmetros de cultivo; manejo (irrigação e campo); e solo (características físicas e capacidade de armazenamento) para simulação. A simulação diária da produtividade de biomassa e cobertura do dossel no AquaCrop é integrada ao balanço hídrico do solo. Nesse aspecto, o rendimento simulado da cultura é obtido como produto do índice de colheita e da biomassa, conforme a equação:

$$BAS = WP \times \left(\frac{T_c}{ET_0} \right) \quad (2),$$

em que: BAS é a taxa de biomassa acima do solo (ton ha^{-1}); WP é a produtividade da água [biomassa por unidade de água acumulada transpirada ($\text{kg m}^{-2} \text{mm}^{-1}$)]; T_c é a transpiração da cultura; e ET_0 é a evapotranspiração de referência, usada para normalizar a transpiração da cultura (Steduto et al., 2009).

2.3.1 Parâmetros de clima

O compartimento de entrada de clima do AquaCrop exige temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$), precipitação pluviométrica diária (mm dia^{-1}), evapotranspiração de referência diária [ET_0 (mm dia^{-1})] e concentração média anual de CO_2 na atmosfera (380ppm), selecionado a partir do próprio modelo.

Os dados diários de temperatura máxima, mínima e média do ar, precipitação pluviométrica diária (mm), radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), umidade relativa do ar (%) ($^{\circ}\text{C}$) e velocidade do vento (km h^{-1}) foram obtidos de uma estação meteorológica automática situada ao lado da área experimental.

De posse das informações meteorológicas, com o método de Penman-Monteith (Allen, 2006), procedeu-se ao cálculo da evapotranspiração de referência diária durante o período que abrangeu o ciclo dos experimentos. Durante o período experimental, obteve-se uma temperatura máxima diária variando de 26,9 a 38 $^{\circ}\text{C}$ e temperatura mínima entre 17,1 e 23,8. Por sua vez, a precipitação foi de 1015,40 mm e a evapotranspiração de referência (ET_0) foi de 1760,84 mm durante o ciclo experimental. Na figura 3 encontra-se um resumo das condições meteorológicas diárias durante o período que abrangeu a condução dos experimentos.

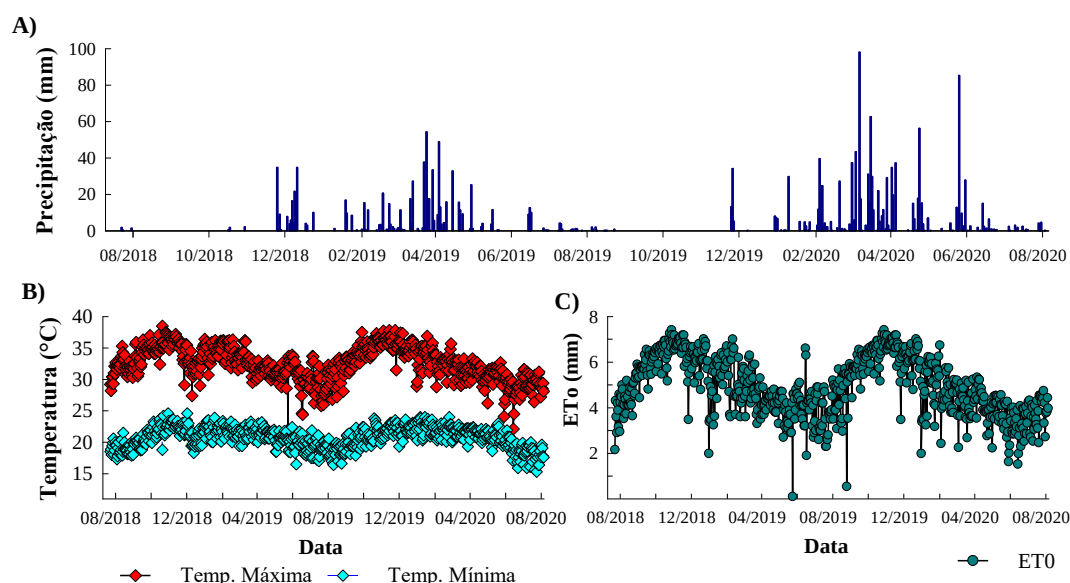


Figura 3. Variações diárias da precipitação (A), das temperaturas máximas e mínimas (B), e da evapotranspiração de referência (ET0) (C) durante o período de condução dos experimentos em Serra Talhada, Pernambuco.

2.3.2 Parâmetros de cultura

As informações de cultivo obtidas nos experimentos dizem respeito à condução do cultivo; seu desenvolvimento (cobertura do dossel, profundidade efetiva do sistema radicular, duração do ciclo da cultura); produção (índice de colheita); restrições quanto à fertilidade do solo, entre outros parâmetros utilizados na calibração do AquaCrop, conforme a tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros calibrados no AquaCrop.

Parâmetros	
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	Produtividade da água normalizada (g m ⁻²)
Cobertura inicial do dossel (%)	Índice de colheita - HI (%)
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	Função de expansão do dossel
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	p-superior
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	p-inferior
Emergência (DAP)	Forma da curva
Máximo desenvolvimento do dossel (DAP)	Função de fechamento estomático
Início da senescência (DAP)	p-superior
Início da floração (DAP)	Forma da curva
Profundidade da raiz (m)	Função de senescência no dossel precoce
Profundidade máxima da raiz (DAP)	p-superior
Max. Evapotranspiração da cultura (kc)	Forma da curva
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	Efeito da fertilidade não considerado
Efeito da Cobertura do Dossel ao final do ciclo (%)	Temperatura base
Fator de forma	Temperatura superior

DAP: dias após plantio

2.3.3 Parâmetros do solo

Na Tabela 3, encontra-se os dados de solo de entrada no modelo, os quais foram: textura do solo, umidade no ponto de murcha permanente, umidade na capacidade de campo, conteúdo de água na saturação e condutividade hidráulica saturada. O AquaCrop admite a inserção de até cinco camadas de solo. Assim foram consideradas as camadas: 0-10 cm; 10-20 cm; 20-30 cm; 30-40 cm e 40-70 cm para inserção dos atributos físico-hídricos.

Tabela 3. Parâmetros de entrada no modelo AquaCrop no compartimento de solo para o processo de calibração do modelo para sistemas de produção de forragem.

Horizonte	Características dos horizontes do solo				
	PMP %	CC %	SAT	Ksat (mm dia ⁻¹)	TAD (mm m ⁻¹)
1 (0-10 cm)	3,9	10,1	45,2	42,73	58
2 (10-20 cm)	4,5	10,6	44,9	38,8	59
3 (20-30 cm)	4,5	10,8	44,8	52,04	61
4 (30-40 cm)	5,1	11,4	44,5	33,95	63
5 (40-70 cm)	6	17,4	44,2	31,4	113

PMP: ponto de murcha permanente; CC: umidade na capacidade de campo; SAT: conteúdo de água na saturação; Ksat: condutividade hidráulica na condição saturada; TAD: teor de água disponível.

2.3.4 Parâmetros de manejo

No compartimento de manejo, as informações de entrada no modelo consistiram no manejo de irrigação e no manejo do solo durante o ciclo simulado. Com relação a irrigação as entradas foram: eventos de irrigação ao longo do ciclo; o tipo de sistema de aplicação de água (gotejamento); a eficiência do sistema; a porcentagem de área molhada. Para o manejo do solo, os dados de entrada se referiram: ao nível de fertilidade, ao uso de cobertura, ao manejo de plantas daninhas. O nível de fertilidade do solo foi considerado próximo ao ideal, a cobertura do solo por restos foi considerada em 100% para os tratamentos com níveis de cobertura morta e 0% para o manejo sem cobertura morta, bem como para os tratamentos dos demais experimentos.

Ademais, para os sistemas consorciados também se calibrou valores referentes à competição com erva daninha, no intuito de inferir sobre a competição entre as culturas. Assim, para os dois sistemas consorciados mais adensados considerou-se o manejo como “bom” e para os sistemas menos adensados “muito bom”.

2.4 OBTENÇÃO DE PARÂMETROS PRODUTIVOS E DE DESENVOLVIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA

Os parâmetros biomassa seca e cobertura do dossel (CC), obtidos ao longo dos ciclos experimentais, foram utilizados nos processos de calibração e avaliação do AquaCrop.

Para determinação da biomassa (matéria fresca e seca) foi selecionada uma planta representativa por parcela para cada tratamento, que em seguida foi cortada e pesada em balança eletrônica para obtenção do peso fresco (matéria fresca), logo após foram escolhidos dois cladódios do terço médio da planta e pesados novamente, posteriormente fracionados, acondicionados em sacos de papel identificados e levados à estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de 65 °C até obtenção da massa constante (matéria seca). Nas colheitas, a produtividade em matéria fresca (ton ha^{-1}) foi referente ao produto entre a densidade final de plantas e o peso fresco médio das plantas da parcela útil. A produtividade em matéria seca (ton ha^{-1}) foi resultante do produto entre a matéria fresca e o teor de matéria seca, proveniente da relação de matéria fresca e seca dos cladódios.

Foram obtidos os seguintes dados biométricos para uma planta em cada tratamento: altura da planta — contabilizada da superfície do solo até o limite superior da planta —; largura da planta, maior distanciamento horizontal entre as extremidades; número total de cladódios (unidades) e número de cladódios por ordem. Foi selecionada uma ramificação representativa da planta a fim de serem feitas avaliações de altura, largura, perímetro e espessura (mm) de todos os cladódios. Seguindo a metodologia sugerida por Silva et al., (2014) determinou-se a área dos cladódios (m^2). Subsequentemente, determinou-se o índice de área do cladódio (IAC) ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), por meio da razão entre área do cladódio e o espaçamento de cultivo, conforme Pinheiro et al., (2014). Após isso, obteve-se o coeficiente de cobertura do dossel (CC %) (Heng et al., 2009), conforme a Equação 3:

$$\text{CC} = 1,005 [1 - \exp(-0,6 \text{ IAC})]^{1,2} \quad (3),$$

em que:

CC: cobertura do dossel verde (%);

IAC: índice de área de cladódio.

2.5 CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO AQUACROP E ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

No processo de calibração, utilizou-se a médias das informações de cultivo de dois blocos do delineamento como entrada no modelo e ajustadas para simular a cobertura do dossel (CC) e os rendimentos, isto é, produtividade de biomassa (Y) (ton ha⁻¹), Araya et al., (2016).

De posse do modelo calibrado, procedeu-se a realização da avaliação, que foi baseada na comparação entre dados simulados (previstos) e os dados observados de dois dos blocos do delineamento experimental, blocos estes que não foram utilizados durante o processo de calibração. Na avaliação, os dados analisados também foram a biomassa seca e a cobertura do dossel.

Para inferir sobre a precisão do modelo nos processos de calibração e de avaliação, cinco indicadores estatísticos de adequação foram adotados para a simulação da CC e da produtividade [biomassa simulada (Ys)], a saber: raiz do erro quadrático médio (RMSE) e RMSE normalizado (NRMSE), coeficiente de determinação (R²), coeficiente de eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (EM) e índice de concordância de Willmott (d). Nos processos de calibração e avaliação as produtividades simuladas no modelo foram comparadas com as produtividades observadas (Yo, kg ha⁻¹).

2.5.1 Raiz relativa do erro quadrado médio normalizado (RMSE) e Erro quadrado médio da raiz normalizado (RMSE)

A raiz quadrada do erro quadrático médio ou RMSE consiste em um dos indicadores estatísticos mais utilizados e mede a magnitude média da diferença entre as previsões e as observações. Descrito na equação 3, o RMSE apresenta a diferença relativa entre dado simulado e observado. Ele varia de 0 (zero) a infinito positivo, com este indicando um fraco desempenho, e aquele indicando bom desempenho do modelo, e é dado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N * \sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2}} \quad (4)$$

em que: P_i, O_i e N são valores previstos, observados e quantidade de valores, respectivamente.

Uma grande vantagem do RMSE é que ele resume a diferença média nas unidades previstas e observadas, no entanto, ele não diferencia entre superestimação e subestimação.

Por sua vez, o RMSE normalizado (NRMSE) é expresso em porcentagem e dá uma indicação da diferença relativa entre os dados simulados e os observados.

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{1}{N \sum_{i=0}^n (P_i - O_i)^2}} * 100 \quad (5)$$

em que $\bar{O}$: é a média dos valores observados. Valor de NRMSE inferior a 10% indicam que o modelo é “muito bom” na simulação para a modelagem. O NRMSE na faixa de 10 a 20% e 20% a 30%, respectivamente indicam bom desempenho e moderada precisão do modelo na simulação, todavia valor maior que 30% indica fraca simulação.

2.5.2 Coeficiente de determinação (R^2)

O coeficiente de determinação (R^2) é definido como o valor quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. R^2 significa a proporção da variância nos dados medidos explicada pelo modelo, ou também pode ser interpretado como a razão quadrada entre a covariância e os desvios padrão multiplicados das observações e previsões. Ele varia de 0 a 1, com valores próximos a 1 indicando uma boa concordância.

$$R^2 = \left[\frac{\sum (E_o - \bar{E}_o)(E_s - \bar{E}_s)}{\sqrt{\sum (E_o - \bar{E}_o)^2 \sum (E_s - \bar{E}_s)^2}} \right]^2 \quad (6)$$

em que: E_o é o evento observado; E_s o evento simulado; $\bar{E}_o$ a média do evento observado no período de simulação; $\bar{E}_s$ a média do evento simulado no período de simulação; e n , o número de eventos.

2.5.3 Coeficiente de eficiência do modelo Nash-Sutcliffe (EM)

O coeficiente de eficiência do modelo (EM) de Nash e Sutcliffe (1970) determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância das observações, ou seja, o EM indica o quão bem o gráfico de dados observados versus dados simulados se ajusta a uma linha 1:1. Valores de EM podem variar de menos infinito a 1 (um). O EM igual ou próximo a 1 indica uma combinação perfeita entre o modelo e as observações, EM igual a 0 significa que as previsões do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados,

enquanto um EM negativo ocorre quando a média das observações é uma previsão melhor do que o modelo (Saad et al., 2014).

$$EM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_o - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_o - \overline{E_o})^2} \quad (7)$$

Em que E_o é o evento observado; E_s o evento simulado; $\overline{E_o}$ a média do evento observado no período de simulação; e n , o número de eventos.

2.5.4 Índice de concordância de Willmot (d)

O índice de concordância (d) foi proposto por Willmott (1982) para medir o grau de proximidade entre os dados observados e dados previstos. Representa a razão entre o erro quadrático médio e o “erro potencial”, que é definido como a soma dos valores absolutos ao quadrado das distâncias dos valores previstos para o valor observado médio e distâncias dos valores observados para o valor observado médio. O “d” varia entre 0 e 1, no qual valores próximos a 0 indicam nenhuma concordância e próximos a 1 indicam uma concordância perfeita entre os dados previstos e observados. O índice “d” é obtido da seguinte forma:

$$d = 1 - \frac{\sum (E_s - E_o)^2}{\sum (|E_s - \overline{E_o}| + |E_o - \overline{E_o}|)^2} \quad (8)$$

Em que: E_o é o evento observado; E_s o evento simulado; $\overline{E_o}$ a média do evento observado no período de simulação; $\overline{E_s}$ a média do evento simulado no período de simulação; e n , o número de eventos.

3. RESULTADOS

3.1 PARÂMETROS CALIBRADOS, CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO AQUACROP PARA OS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM

3.1.1 Sistema de produção: palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,00 m entre fileiras

Maiores valores de WP foram observados conforme os menores espaçamentos entre plantas. Nesse quesito o sistema mais adensado superou em 30,54; 33,95; 196, 69 e 201,68 %, respectivamente, os espaçamentos 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m. Mior valor de CC foi obtido no espaçamento mais adensado

Tabela 4. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira sob diferentes espaçamentos de cultivo em consórcio com sorgo.

Parâmetros	Espaçamento entre plantas de palma (m)				
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	10,0	5,0	3,3	2,5	2,0
Cobertura inicial do dossel (%)	5	2,5	1,67	1,25	1,00
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	2,5	2,5	2,3	2,3
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	74	59	55	62	57,0
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Emergência (DAC)	0	0	0	0	0
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	185	245	245	245	275
Início da senescência (DAC)	457	457	457	457	457
Início da floração (DAC)	457	457	457	457	457
Profundidade da raiz (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Profundidade máxima da raiz (DAC)	160	175	195	285	285
Max, Evapotranspiração da cultura (Kc)	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	NC	NC	NC	NC	NC
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	35,9	27,5	26,8	12,1	11,9
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100	100
Função de expansão do dossel					
p-superior	0,45	0,45	0,45	0,50	0,50
p-inferior	0,75	0,75	0,75	0,8	0,8
Forma da curva	5,00	5,00	5,00	6,00	6,00
Função de fechamento estomático					
p-superior	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Forma da curva	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Função de senescência no dossel precoce					
p-superior	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	4,50	4,50	4,50	5,00	5,00
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada (%)	16 / 6	14 / 5	7 / 8	6 / 4	5 / 3

NC: não considerado

Na Tabela 5, encontra-se os valores dos parâmetros calibrados para o sorgo em consórcio com a palma. Verificou-se maior WP para a cultura dentro do espaçamento 0,20 m.

Além disso, os maiores valores de CC foram calibrados para a cultura dentro dos tratamentos 0,10 e 0,20, com CC em 81 e 87 %, respectivamente.

Tabela 5. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura do sorgo forrageiro em consórcio com a palma forrageira conduzida sob diferentes espaçamentos de plantio.

Parâmetros	Sorgo em consorcio com a palma em diferentes espaçamentos (E)				
	Sorgo	Sorgo	Sorgo	Sorgo	Sorgo
	× E1	× E2	× E3	× E4	× E5
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Cobertura inicial do dossel (%)	2,70	3,10	3,30	3,50	3,90
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	8,50	7,30	7,00	7,00	7,10
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	81	87	74	74	75
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,9	5,0	3,0	3,0	3,0
Emergência (DAC)	5	5	5	5	5
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	75	85	85	82	75
Início da senescência (DAC)	100	100	100	100	100
Início da floração (DAC)	106	106	106	106	106
Profundidade da raiz (m)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Profundidade máxima da raiz (DAC)	90	80	80	75	75
Max , Evapotranspiração da cultura (Kc)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	18,4	21,5	20,8	20,5	19,1
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100	100
Função de expansão do dossel					
p-superior	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
p-inferior	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Função de fechamento estomático					
p-superior	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Função de senescência no dossel precoce					
p-superior	0,65	0,75	0,75	0,75	0,75
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada (%)	16 / 6	14 / 5	7 / 8	6 / 4	6 / 4

NC: não considerado; E1 (espaçamento1): 0,10 m; E2 (espaçamento2): 0,20 m; E3 (espaçamento 3): 0,30 m; E4 (espaçamento 4): 0,40 m; E5 (espaçamento5): 0,50 m.

Conforme a Figura 4, os testes estatísticos mostraram, de um modo geral, boa precisão do modelo na simulação da CC e da produtividade para a palma ao longo do seu ciclo, resultando em valores de NRMSE entre 10 e 20; R² superior a 0,90 e EM maior que 0,94 para a produtividade e CC dos espaçamentos 0,20 m e 0,30 m.

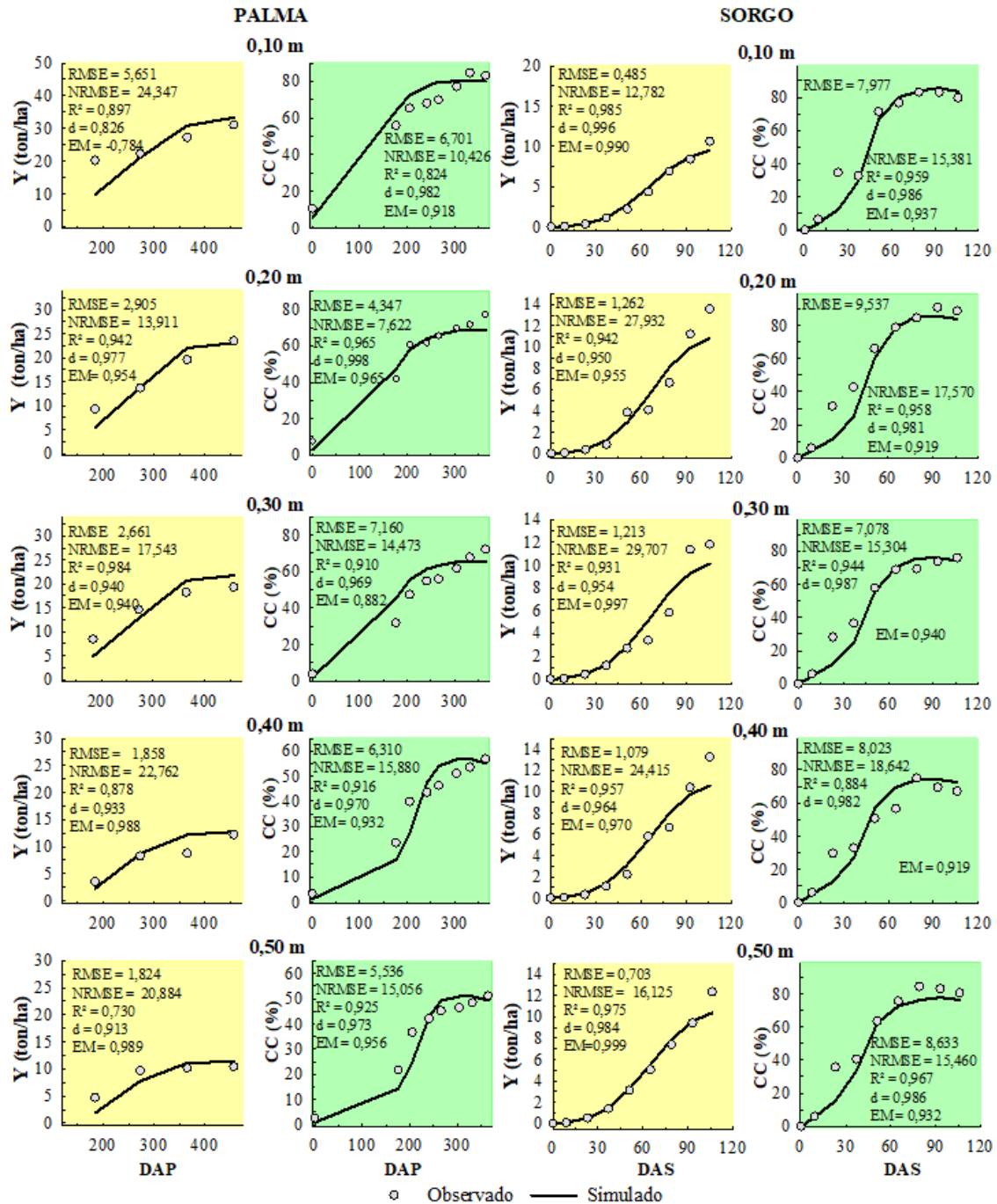


Figura 4. Produtividade e cobertura do dossel observadas e simuladas e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para diferentes espaçamentos de plantio para o consórcio palma-sorgo.

Para o espaçamento 0,10 m, os parâmetros mostraram moderada precisão do modelo, com valores de NRMSE maior que 20 e EM com valores negativos. Para os espaçamentos menos adensados (0,40 e 0,50 m), a biomassa simulada ficou com precisão moderada, de acordo com NRMSE. Além disso, para esses dois espaçamentos o R^2 foi inferior a 0,90. Por outro lado, os valores de EM e “d” foram satisfatórios ($d > 0,90$ e $EM > 0,92$).

Com relação à cultura do sorgo, os indicadores mostraram melhor precisão na simulação da biomassa (Y_s) quando conduzido em consórcio com o clone no espaçamento 0,10 m, visto que apresentou o menor valor de NRMSE e de RMSE, e os maiores valores de EM, “d” e R^2 .

Quando se analisa a Y_s para os sistemas, ou seja, a soma da biomassa das duas culturas, obteve no espaçamento 0,10 m uma biomassa seca de 42,82 ton ha⁻¹, que é, respectivamente, superior em 26,20; 32,51; 87,31 e 95,04 % que a dos sistemas no espaçamento 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m.

Na Tabela 6 constata-se os parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo para a cultura da palma. Com base no NRMSE, obteve-se para Y_s do espaçamento 0,10 m moderada precisão, uma vez que para esse parâmetro os valores ficaram entre 20 e 30 para a simulação nos espaçamentos 0,20; 0,40 e 0,50 m. No que diz respeito ao processo de validação do modelo para o sorgo (Tabela 7) nos manejos em análise, os testes indicaram melhor precisão para a biomassa simulada da cultura no espaçamento 0,30 m, visto que $R^2 = 0,982$; EM = 0,957; NRMSE = 13,856 e d = 0,982. Para os demais tratamentos, pelo NRMSE, a simulação foi uma precisão “moderada”. Ademais, esses tratamentos também apresentaram EM inferior a 0,90 e R^2 que variou de 0,785 a 0,868.

Tabela 6. Parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade (Y_s) (MS,ton/ha) para a palma forrageira (A) conduzida sob espaçamentos entre plantas e em consórcio com o sorgo (B).

A) Espaçamento entre de plantas de palma										
Indicador	0,10 m		0,20 m		0,30 m		0,40 m		0,50 m	
	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s
RMSE	10,441	3,717	12,154	3,799	6,157	9,001	8,722	3,171	13,875	2,502
R^2	0,786	0,943	0,925	0,786	0,943	0,946	0,864	0,886	0,767	0,577
d	0,951	0,941	0,905	0,904	0,979	0,725	0,947	0,904	0,875	0,910
EM	0,777	0,637	0,507	0,750	0,925	-0,859	0,813	0,944	0,458	0,970
NRMSE	16,983	16,298	26,979	21,784	11,084	37,665	19,841	29,173	28,565	28,546
B) Espaçamento entre de plantas de palma										
Indicador	0,10 m		0,20 m		0,30 m		0,40 m		0,50 m	
	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s
RMSE	1,002	13,200	1,350	9,689	1,531	5,152	0,977	11,987	0,977	9,671
R^2	0,943	0,868	0,929	0,954	0,923	0,982	0,965	0,785	0,965	0,938
d	0,982	0,958	0,937	0,977	0,919	0,990	0,969	0,956	0,969	0,972
EM	0,956	0,808	0,966	0,893	0,935	0,957	0,977	0,821	0,977	0,875
NRMSE	29,397	25,686	31,660	22,174	37,109	13,856	21,011	24,670	21,011	23,435

3.1.2 Sistema de produção: palma forrageira consorciada com sorgo e submetida a espaçamentos entre plantas, com espaçamento fixo de 1,25m entre fileiras

Na Tabela 7 observa-se os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma submetida a diferentes espaçamentos entre plantas. Constatou-se que os maiores valores de WP foram calibrados conforme menor espaçamento entre plantas. Assim, o sistema mais adensado (0,10 m) superou em 41,33; 78,60; 101,68 e 121,60%, respectivamente, os espaçamentos 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m. Ademais, maiores adensamentos resultaram em menor número de dias após o corte para atingir o máximo desenvolvimento do sistema radicular e máximo desenvolvimento do dossel.

Tabela 7. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira em consórcio com o sorgo e conduzida sob diferentes espaçamentos entre plantas.

Parâmetros	Espaçamento entre plantas de palma (m)				
	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	8,0	4,0	2,7	2,0	1,6
Cobertura inicial do dossel (%)	3,36	1,4	1,05	0,9	0,76
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,1	2,2	2,4	2,3	2,2
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	56	43	57	49	33,0
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Emergência (DAC)	0	0	0	0	0
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	250	270	275	255	290
Início da senescência (DAC)	457	457	457	457	457
Início da floração (DAC)	457	457	457	457	457
Profundidade da raiz (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Profundidade máxima da raiz (DAC)	285	300	315	315	325
Max. Evapotranspiração da cultura (Kc)	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	NC	NC	NC	NC	NC
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	35,9	25,4	20,1	17,8	16,2
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100	100
Função de expansão do dossel					
p-superior	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
p-inferior	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Forma da curva	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Função de fechamento estomático					
p-superior	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Forma da curva	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Função de senescência no dossel precoce					
p-superior	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada	13%/5%	10%/6%	7%/5%	6%/4%	4%/2%

Na Tabela 8 observa-se os valores dos parâmetros calibrados para o sorgo em consórcio com a palma. Verificou-se maior valor para WP e CC para a cultura dentro do espaçamento

0,10 m. O sorgo dentro do espaçamento 0,10 m apresentou produtividade da água (WP) superior em 5,51 % em relação aos espaçamentos 0,20, 0,30 e 0,40 m, e 21,95 % maior que o espaçamento 0,50 m

Tabela 8. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura do sorgo forrageiro em consórcio com a palma forrageira conduzida sob diferentes espaçamentos de plantio e espaçamento fixo de 1,25m entre linhas.

Parâmetros	Sorgo em consorcio com a palma em diferentes espaçamentos (E)				
	Sorgo	Sorgo	Sorgo	Sorgo	Sorgo
	x E1	x E2	x E3	x E4	x E5
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0
Cobertura inicial do dossel (%)	1,60	1,92	2,00	2,10	3,90
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	9,20	8,60	7,60	7,60	7,10
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	81	93	74	75	75
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Emergência (DAC)	5	5	5	5	5
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	75	92	85	85	75
Início da senescência (DAC)	103	106	100	100	100
Início da floração (DAC)	106	106	107	107	107
Profundidade da raiz (m)	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Profundidade máxima da raiz (DAC)	90	80	75	75	75
Max. Evapotranspiração da cultura (Kc)	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	22,3	22,7	23,2	25,1	19,1
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100	100
Função de expansão do dossel					
p-superior	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
p-inferior	0,60	0,55	0,55	0,55	0,55
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Função de fechamento estomático					
p-superior	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Função de senescência no dossel precoce					
p-superior	0,65	0,75	0,75	0,75	0,75
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom	Muito bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada	13%/5%	11%/6%	7%/5%	6%/4%	4%/2%

NC: não considerado; E1 (espaçamento 1): 0,10m; E2 (espaçamento 2): 0,20m; E3 (espaçamento 3): 0,30m; E4 (espaçamento 4): 0,40m; E 5 (espaçamento5): 0,50

Conforme a Figura 5, os testes estatísticos mostraram “muito boa” precisão do modelo na simulação da produtividade para a palma ao longo do seu ciclo nos espaçamentos 0,10 e 0,30 m, com valores de NRMSE < 10; R² > 0,95 e EM > 0,95. Para o espaçamento 0,20 m verificou-se boa precisão, com valores de NRMSE entre 10 e 20, R² = 0,90 e “d”= 0,97. Para os espaçamentos menos adensados (0,40 e 0,50 m), a biomassa simulada ficou com precisão

moderada, de acordo com NRMSE. Por outro lado, os valores de EM e “d” foram satisfatórios ($d > 0,92$ e $EM > 0,95$).

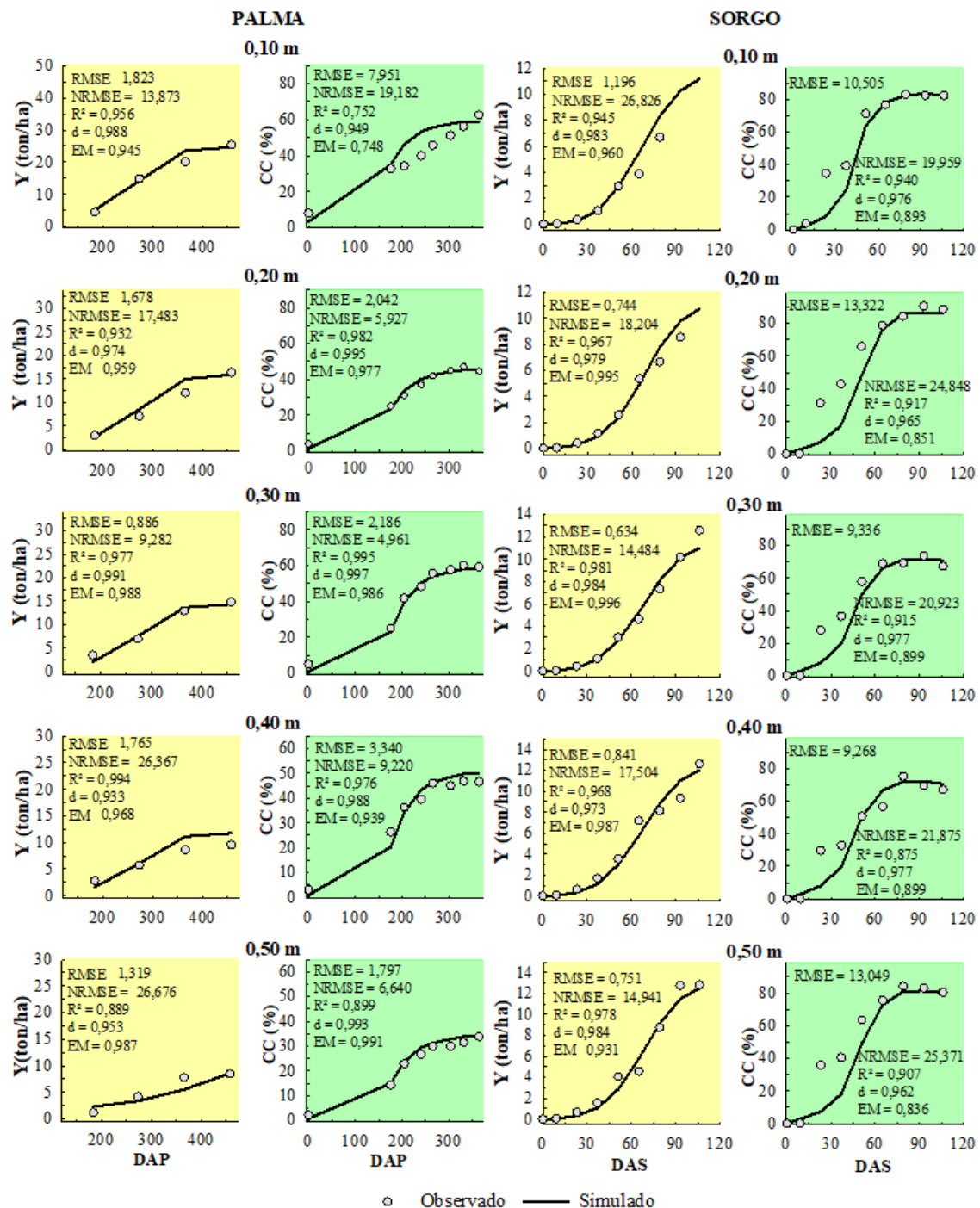


Figura 5. Produtividade e cobertura do dossel (CC) observadas e simuladas, com o AquaCrop, e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para a palma forrageira conduzida sob espaçamentos entre plantas e em consórcio com o sorgo.

Com relação à cultura do sorgo, os indicadores sugerem melhor precisão na simulação da biomassa para a cultura conduzida dentro dos espaçamentos 0,30 m e 0,50, visto que apresentou o menor valor de NRMSE e de RMSE, e os maiores valores de EM, “d” e R^2 .

Quando se analisa a Y_s para os sistemas observa-se no espaçamento 0,10 m uma biomassa seca de 34,16 ton/ha, deste sendo 72,5 % referente à palma e 27,5 % ao sorgo. Assim a Y_s desse sistema foi superior em 27,92; 39,51; 36,55 e 80,38 % que a produtividade nos espaçamentos 0,20; 0,30; 0,40 e 0,50 m, respectivamente.

Na tabela 9 é possível observar os parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo para a cultura da palma. Para os espaçamentos 0,10 e 0,30 m, o NRMSE indicou boa precisão para Y_s , já para o espaçamento 0,50 m a precisão foi fraca (NRMSE > 30). Para 0,10 m, ainda, R^2 ficou em 0,911 e EM em 0,902. Para a cobertura do dossel (CC) dos arranjos em análise, com exceção do espaçamento 0,10 m, os valores de EM e R^2 ficaram acima de 0,91 para todos os espaçamentos. O NRMSE indicou muito boa precisão para 0,20 m; boa precisão para 0,10; 0,20 e 0,40 m; moderada precisão para 0,50 m. No que tange o processo de validação para o sorgo (Tabela 9B) nos manejos em análise, os testes indicaram, de maneira geral, boa precisão do modelo, visto que R^2 e EM > 0,90 ; NRMSE < 30 (exceto dentro do espaçamento 0,20 m) e $d > 0,90$.

Tabela 9. Parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade (Y_s) (MS,ton ha⁻¹) para a palma forrageira (A) conduzida sob espaçamentos entre plantas e em consórcio com o sorgo (B).

A) Espaçamento entre de plantas de palma										
Indicador	0,10 m		0,20 m		0,30 m		0,40 m		0,50 m	
	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s
RMSE	9,449	3,168	3,722	2,748	6,591	1,285	5,032	1,645	4,787	1,352
R^2	0,761	0,911	0,981	0,869	0,953	0,980	0,957	0,923	0,988	0,945
d	0,958	0,972	0,989	0,939	0,982	0,985	0,983	0,961	0,992	0,971
EM	0,817	0,902	0,954	0,918	0,914	0,981	0,938	0,977	0,988	0,991
NRMSE	15,370	17,597	8,262	26,844	11,866	11,726	11,448	21,273	28,650	33,592
B) Espaçamento entre de plantas de palma										
Indicador	0,10 m		0,20 m		0,30 m		0,40 m		0,50 m	
	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s	CC	Y_s
RMSE	14,828	1,510	7,958	1,494	8,334	0,741	13,646	0,907	10,115	1,225
R^2	0,850	0,970	0,961	0,957	0,943	0,927	0,810	0,905	0,940	0,916
d	0,949	0,975	0,984	0,857	0,977	0,963	0,937	0,957	0,973	0,902
EM	0,777	0,949	0,928	0,983	0,886	0,990	0,711	0,984	0,863	0,914
NRMSE	28,186	28,822	18,212	48,422	22,413	16,255	29,457	18,085	24,510	22,580

3.1.3 Sistema de produção: palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo e consorciada com sorgo

Na Tabela 10 encontra-se os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura da palma forrageira conduzida sob espaçamentos de linhas de cultivo em consórcio com sorgo. Verificou-se que quanto menor o espaçamento entre linhas, isto é, mais adensado for o sistema, maiores os valores calibrados de CC. Além disso, a maior velocidade para atingir o máximo valor de CC foi obtida quanto menor o espaçamento. A menor produtividade da água foi obtida para o menor espaçamento entre linha, enquanto que os espaçamentos 1,25 e 1,50 m foram os mais produtivos do ponto de vista hídrico. Nesse aspecto, a WP calibrada desses tratamentos foram 15,67 e 15,2 % maior que a do espaçamento 1,00 m, respectivamente.

Tabela 10. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo em consórcio com sorgo (IPA-2502).

Parâmetros	Espaçamento entre linha de cultivo (m)			
	1,00	1,25	1,50	1,75
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5,0	4,0	3,3	2,9
Cobertura inicial do dossel (%) (cm ²)	2,5	1,8	1,66	1,16
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,0	1,9	1,8	1,7
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	67	62	46	44
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	3,0	3,1	3,1
Emergência (DAC)	0	0	0	0
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	300	310	330	360
Início da senescência (DAC)	457	457	457	457
Início da floração (DAC)	457	457	457	457
Profundidade da raiz (m)	0,7	0,7	0,7	0,7
Profundidade máxima da raiz (DAC)	260	275	280	195
Max. Evapotranspiração da cultura (Kc)	0,52	0,52	0,52	0,52
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	NC	NC	NC	NC
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25
Fator de forma				
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	20,4	23,5	23,6	21,1
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100
Função de expansão do dossel				
p-superior	0,45	0,45	0,45	0,45
p-inferior	0,80	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	5,00	5,00	5,00	5,00
Função de fechamento estomático				
p-superior	0,75	0,75	0,75	0,75
Forma da curva	4,00	4,00	4,00	4,00
Função de senescência no dossel precoce				
p-superior	0,80	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	4,50	4,50	4,50	4,50
Efeito da fertilidade não considerado	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada	10%/5%	9%/4%	7%/3%	5%/3%

NC: não considerado

Na Tabela 11 encontra-se os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para o sorgo conduzido em consócio com a palma submetida a diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo. Conforme menor o espaçamento de linha de cultivo, maior o valor de CC. Ainda, obteve-se os maiores valores de WP conforme menor espaçamento de linha de cultivo, senão vejamos: o sistema mais adensado apresentou 14,17; 15,07; e 16,00% maior produtividade da água em comparação aos espaçamentos 1,25; 1,50 e 1,75 m, respectivamente.

Tabela 11. Parâmetros calibrados no AquaCrop para o sorgo conduzido em consócio com a palma forrageira OEM sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo.

Parâmetros	Espaçamento entre linhas de cultivo			
	1,00 m	1,25 m	1,50 m	1,75 m
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	20,00	16,00	13,30	11,40
Cobertura inicial do dossel (%)	8,60	5,92	4,50	2,85
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	5,30	5,40	5,00	5,20
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	99	92	72	56
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,1	3,1	3,4	3,1
Emergência (DAC)	5	25	25	25
Máximo desenvolvimento do dossel (DAC)	105	102	100	85
Início da senescência (DAC)	107	107	107	180
Início da floração (DAC)	107	107	107	180
Profundidade da raiz (m)	0,45	0,45	0,45	0,45
Profundidade máxima da raiz (DAC)	70	70	70	70
Max. Evapotranspiração da cultura (Kc)	1,1	1,1	1,1	1,1
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	29	25,4	25,2	25,0
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100
Função de expansão do dossel				
p-superior	0,25	0,25	0,25	0,25
p-inferior	0,60	0,55	0,55	0,55
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00
Função de fechamento estomático				
p-superior	0,65	0,65	0,65	0,65
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00
Função de senescência no dossel precoce				
p-superior	0,65	0,75	0,75	0,75
Forma da curva	3,00	3,00	3,00	3,00
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Muito bom	Muito bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada	15%/5%	13%/3%	7%/8%	3%/3%

NC: não considerado

A Figura 6 apresenta a cobertura do dossel simulada (CCs) e a observada (CCo), bem como as produtividades observadas (Yo) e simuladas (Ys) para a palma forrageira sob diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo e consorciada com sorgo. Observou-se que para a CC, de acordo com o NRMSE, a precisão ficou classificada como “muito boa” (<10%) para todos os tratamentos, excetuando-se o tratamento 1,50 m com “boa precisão”. Com relação à

biomassa simulada, a precisão foi boa para 1,00 e 1,75 m, uma vez que NRMSE ficou entre 10 e 20. O índice “d” ficou acima de 0,93 para a Ys da palma em todos os espaçamentos. O índice de eficiência de modelagem (EM) foi menor que 0,90 para todos os espaçamentos, exceto 1,75 m. O espaçamento 1,00 m entre linhas se apresentou como mais produtivo, visto que proporcionou uma biomassa simulada de 31,01 ton ha⁻¹, sendo 61,31% deste valor referente à biomassa da palma. Os sistemas 1,25; 1,50 e 1,75 m apresentaram Ys igual a 30,22; 27,22 e 24,06 ton/ha, respectivamente.

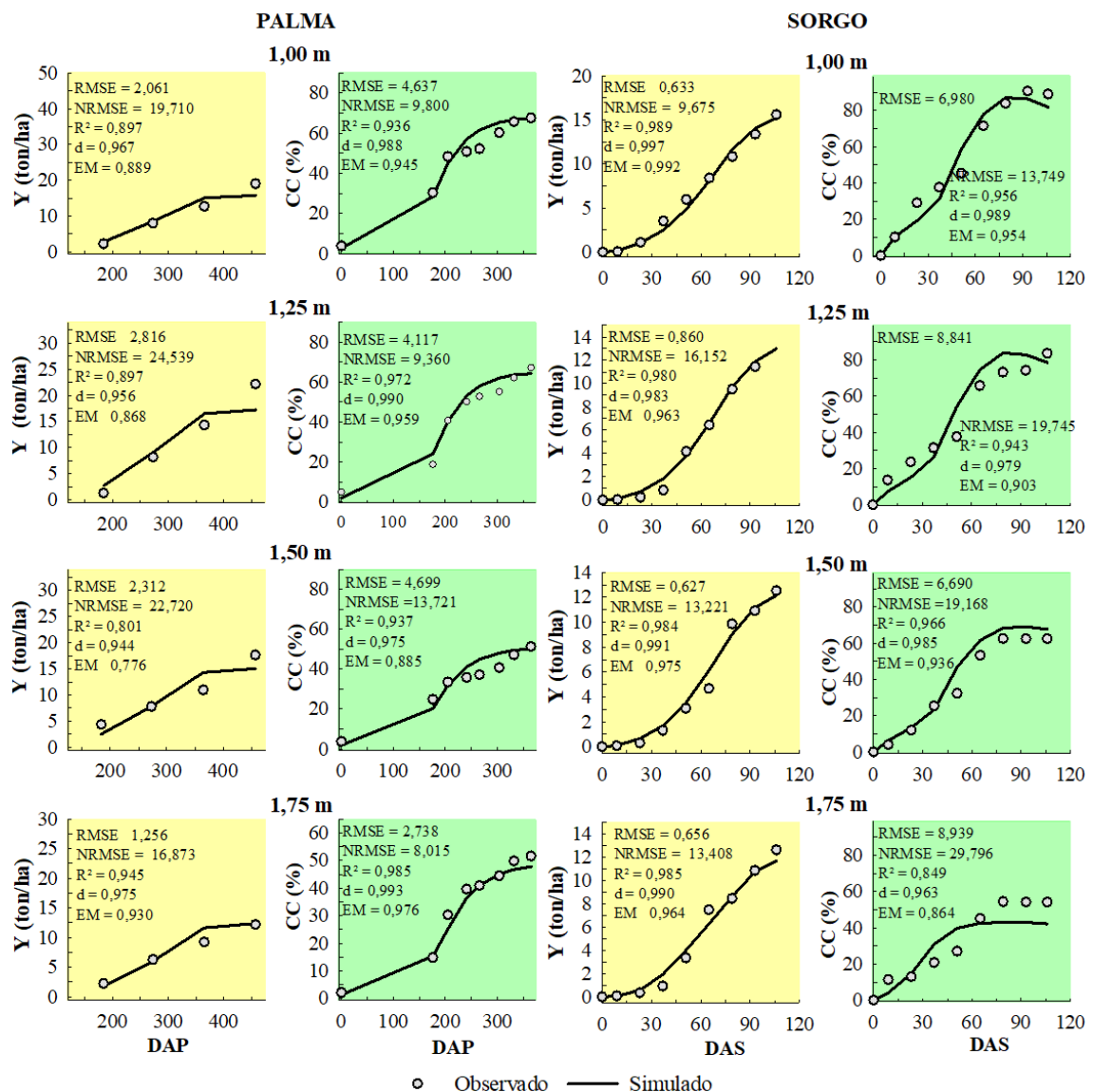


Figura 6. Produtividade (Y) e cobertura do dossel (CC) observadas e simuladas para o consórcio palma-sorgo, com o AquaCrop, e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para ambas as culturas.

Na Tabela 12A é possível observar os parâmetros estatísticos obtidos na validação do modelo para a cultura da palma. Para o espaçamento 1,00 m o NRMSE indicou moderada precisão para Ys, enquanto para os demais arranjos, fraca (NRMSE > 30). Para 1,00 m, ainda, R² ficou em 0,896; EM = 0,862 e “d” = 0,956. Para a cobertura do dossel (CC) dos sistemas em análise, com exceção do espaçamento 1,25 m, os valores de EM e R² ficaram acima de 0,88 e NRMSE entre 10 e 14, indicando “boa precisão”. No que tange o processo de validação para o sorgo (tabela 12B) nos manejos em análise, os testes indicaram boa precisão para a Ys nos espaçamentos 0,20 e 0,30, visto que R² e EM > 0,90 e “d” > 0,93. Para os espaçamentos 1,00 e 1,75 o NRMSE indicou fraca e moderada precisão, respectivamente.

Tabela 12. Parâmetros estatísticos obtidos na avaliação do modelo Aquacrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade da palma forrageira (A) sob diferentes espaçamentos entre fileiras de cultivo em consórcio com o sorgo (B).

A) Espaçamento entre linhas de cultivo de palma								
Indicador	1,00 m		1,25 m		1,50 m		1,75 m	
	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys
RMSE	5,109	2,291	3,231	3,451	4,699	2,766	0,982	2,523
R ²	0,946	0,896	0,988	0,756	0,937	0,788	0,989	0,789
d	0,979	0,956	0,996	0,922	0,975	0,925	0,983	0,904
EM	0,909	0,862	0,984	0,738	0,885	0,749	0,959	0,805
NRMSE	12,863	21,910	7,074	32,659	13,721	31,961	13,602	33,747

B) Espaçamento entre linhas de cultivo de palma								
Indicador	1,00 m		1,25 m		1,50 m		1,75 m	
	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys
RMSE	8,645	1,917	7,032	0,899	10,431	0,750	7,194	1,497
R ²	0,967	0,951	0,968	0,979	0,893	0,974	0,914	0,937
d	0,984	0,970	0,989	0,979	0,967	0,984	0,984	0,939
EM	0,936	0,919	0,957	0,909	0,868	0,939	0,942	0,979
NRMSE	15,333	38,390	13,905	18,395	23,598	15,162	29,016	27,460

3.1.4 Sistema de produção: palma forrageira sob níveis de cobertura morta

Na Tabela 13 encontra-se os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para a cultura da palma forrageira conduzida sob níveis de cobertura do solo. Observou-se que o máximo desenvolvimento do dossel (%); número de dias para atingir o máximo desenvolvimento do dossel e a produtividade da água (WP) variaram conforme os tratamentos. Constatou-se que quanto maior o nível de cobertura morta, maior a cobertura do dossel calibrada. Verificou-se que a WP calibrada do tratamento sem cobertura morta foi 91,1%; 93,0 e 153,2% menor do que a dos níveis de cobertura 5; 10 e 15 ton ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 13. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira sob cobertura morta do solo.

Parâmetros	Densidade de Cobertura morta (ton/ha)			
	0	5	10	15
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5	5	5	5
Cobertura inicial do dossel (%)	1,25	1,25	1,25	1,25
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2,4	2,8	2,8	2,1
Máx. desenvolvimento do dossel (%)	53	54	58	61
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,1	3,1	3,1	3,1
Emergência (DAC)	15	15	15	15
Máx. desenvolvimento do dossel (DAC)	275	240	240	315
Início da senescência (DAC)	362	362	362	362
Início da floração (DAC)	362	362	362	362
Profundidade da raiz (m)	0,7	0,7	0,7	0,7
Profundidade máxima da raiz (DAC)	112	112	112	112
Max. Evapotranspiração da cultura (kc)	0,52	0,52	0,52	0,52
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	NC	NC	NC	NC
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25
Fator de forma	NC	NC	NC	NC
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	15,8	30,2	30,5	40,8
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100
Função de expansão do dossel				
p-superior	0,32	0,50	0,50	0,50
p-inferior	0,7	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	3,50	6,00	6,00	6,00
Função de fechamento estomático				
p-superior	0,72	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	3,30	4,50	4,50	4,50
Função de senescência no dossel precoce				
p-superior	0,80	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	4,50	4,50	4,50	4,50
Efeito da fertilidade do solo	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	20	20	20	20
Temperatura superior	40	40	40	40
Cobertura do solo por cobertura morta	0%	100%	100%	100%

DAC: dias após corte. NC: não considerado

A Figura 7 apresenta as produtividades e as coberturas de dossel (CC) simuladas e observadas para a palma forrageira submetida a níveis de cobertura morta no solo. O modelo simulou de forma satisfatória a produtividade (Ys) da palma forrageira nos tratamentos com cobertura morta, visto que apresentou NRMSE < 22%; R² > 0,95; EM > 0,95; e d > 0,98. Por outro lado, tendeu a subestimá-la do início até próximo aos 300 DAC para o tratamento sem cobertura morta (NRMSE e R² próximos a 30 e 0,87, respectivamente). Quando se analisa as produtividades simuladas ao final do ciclo, verifica-se que conforme o aumento do nível de cobertura morta do solo maior a biomassa simulada, senão vejamos: 13,16; 25,91; 27,34 e 32,45 ton/ha para os níveis 0; 5; 10 e 15 ton ha⁻¹.

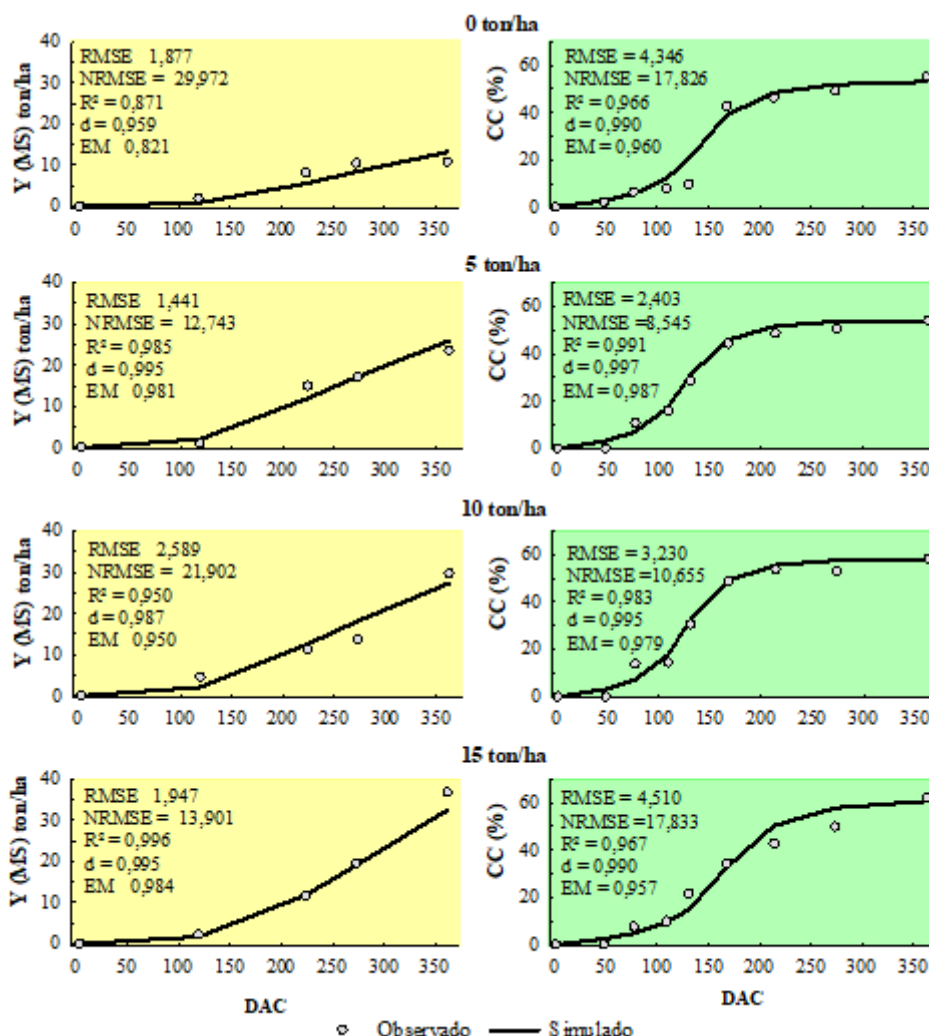


Figura 7. Produtividade (Y) e cobertura do dossel (CC) simuladas com o AquaCrop e observadas e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para a palma forrageira. DAC: dias após corte.

Na Tabela 14 é possível observar os parâmetros estatísticos para a CCs (Cobertura de dossel simulada) e Ys (produtividade [MS-ton ha⁻¹] simulada) obtidos no processo de validação. De modo geral, durante a validação do modelo os parâmetros indicaram boa precisão do modelo na simulação da produtividade e da cobertura do dossel. Verificou-se que o coeficiente de determinação (R²) ficou acima de 0,95 em todos os tratamentos para as duas variáveis simuladas, indicando que o modelo explicou mais de 95% da relação entre a CCo e CCs, e a Yo e a Ys. Não obstante, os valores de NRMSE ficaram abaixo de 30% em todos os tratamentos nas duas variáveis, com exceção do tratamento 5,0 ton ha⁻¹, no qual o NRMSE foi 33,27, indicando uma fraca simulação. O índice “d”, por sua vez, ficou acima de 0,97 para ambas as variáveis em todos os níveis de cobertura morta, apontando que o AquaCrop conseguiu simular a produtividade da palma com alto grau de confiabilidade. Com relação à eficiência de

modelagem (EM), esta ficou acima de 0,95 (ótimo desempenho) para a CCs dos tratamentos 0, 5 e 10 ton/ha. Para a produtividade, a EM ficou abaixo de 0,95, mas acima de 0,90 para todos os tratamentos, indicando bom desempenho do AquaCrop.

Tabela 14. Parâmetros estatísticos obtidos na avaliação do modelo Aquacrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade da palma forrageira sob cobertura morta.

Indicador	Cobertura morta (ton ha ⁻¹)							
	0,0		5,0		10,0		15,0	
	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys
RMSE	3,995	1,322	4,635	2,898	4,611	2,298	6,869	4,616
R ²	0,973	0,954	0,971	0,970	0,961	0,979	0,945	0,999
d	0,992	0,984	0,987	0,973	0,989	0,988	0,978	0,979
EM	0,968	0,944	0,955	0,852	0,952	0,944	0,902	0,940
NRMSE	14,090	21,841	18,042	33,275	14,776	21,529	28,230	27,403

3.1.5 Sistema de produção: palma forrageira submetida a adubação com ureia

Na Tabela 15 é possível observar os valores dos parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma submetida a níveis de adubação com ureia. Verificou-se que quanto maior o nível de adubação a maior produtividade da água, sendo que para os dois maiores níveis (300 e 450 kg ha⁻¹) não houve diferença. A máxima cobertura de dossel calibrada foi para o nível 150 kg ha⁻¹, com 77%. Por sua vez, os níveis 300 e 450 kg ha⁻¹ ficaram em 76%. Além disso, a quantidade de dias após o corte calibrado para atingir o máximo CC ficou em 145 dias para todos os níveis de adubação.

Tabela 15. Parâmetros calibrados no AquaCrop para a palma forrageira submetida a adubação com ureia.

Parâmetros	Adubaçã com ureia (kg ha ⁻¹)			
	50	150	300	450
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	3,2	3,2	3,2	3,2
Cobertura inicial do dossel (%)	1,6	1,6	1,6	1,6
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	4,1	4,2	4,4	4,4
Máximo desenvolvimento do dossel (%)	59	77	76	76
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	3,0	3,0	3,0
Emergência (DAP)	0	0	0	0
Máximo desenvolvimento do dossel (DAP)	145	145	145	145
Início da senescência (DAP)	386	386	386	386
Início da floração (DAP)	386	386	386	386
Profundidade da raiz (m)	0,7	0,7	0,7	0,7
Profundidade máxima da raiz (DAP)	255	245	210	210
Max, Evapotranspiração da cultura (Kc)	0,52	0,52	0,52	0,52
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	NC	NC	NC	NC
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	26,9	32,3	34,6	34,6
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100
Função de expansão do dossel				
p-superior	0,45	0,50	0,50	0,50
p-inferior	0,75	0,8	0,8	0,8
Forma da curva	6,00	6,00	6,00	6,00
Função de fechamento estomático				
p-superior	0,75	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	4,00	4,50	4,50	4,50
Função de senescência no dossel precoce				
p-superior	0,80	0,80	0,80	0,80
Forma da curva	4,50	4,50	4,50	4,50
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40

DAP: dias após plantio. NC: não considerado

A Figura 8 apresenta as produtividades e as coberturas de dossel (CC) simuladas e observadas para a palma forrageira sob níveis de adubação. O modelo simulou de forma satisfatória a produtividade da palma forrageira nos tratamentos com cobertura morta, visto que para os níveis 50; 300 e 450 kg ha⁻¹ apresentou NRMSE entre 10 e 20 (“boa precisão”); $R^2 > 0,98$; $EM > 0,95$; e $d > 0,99$. Para o nível 150 kg ha⁻¹ ocorreu a melhor precisão, isto é “muito boa” (NRMSE = 6,356). Além disso, a Y_s nesse tratamento apresentou EM, R^2 e “d” acima de 0,99 indicando ótima simulação. Para a CC, o NRMSE indicou “boa precisão” para 300 e 450 kg ha⁻¹ e “muito boa” precisão para 50 e 150 kg ha⁻¹. Além disso, o índice “d” foi maior que 0,98 para todos os níveis, enquanto os índices EM e R^2 superaram 0,90.

Com relação aos níveis 350 e 450 kg ha⁻¹, valor de WP calibrado foi igual para ambos os níveis, além disso apresentaram biomassa simulada de 25,67 ton/ha aos 337 dias após corte, que representa 49,9% a superior a do nível 50 kg ha⁻¹. Ademais a diferença entre a produtividade do nível 150 kg ha⁻¹ para a simulada no dos dois últimos níveis de adubação foi de 7,33%,

sugerindo que aplicação de duas ou três vezes a quantidade do adubo não proporciona ganhos expressivos de produtividade para a cultura. Nesse aspecto, a aplicação de 150 kg ha⁻¹ supera em 39,7% a produtividade simulada para nível 50 kg ha⁻¹. Além disso, os três maiores níveis apresentaram CC em torno de 75%, enquanto que o tratamento 50 kg ha⁻¹, 54%.

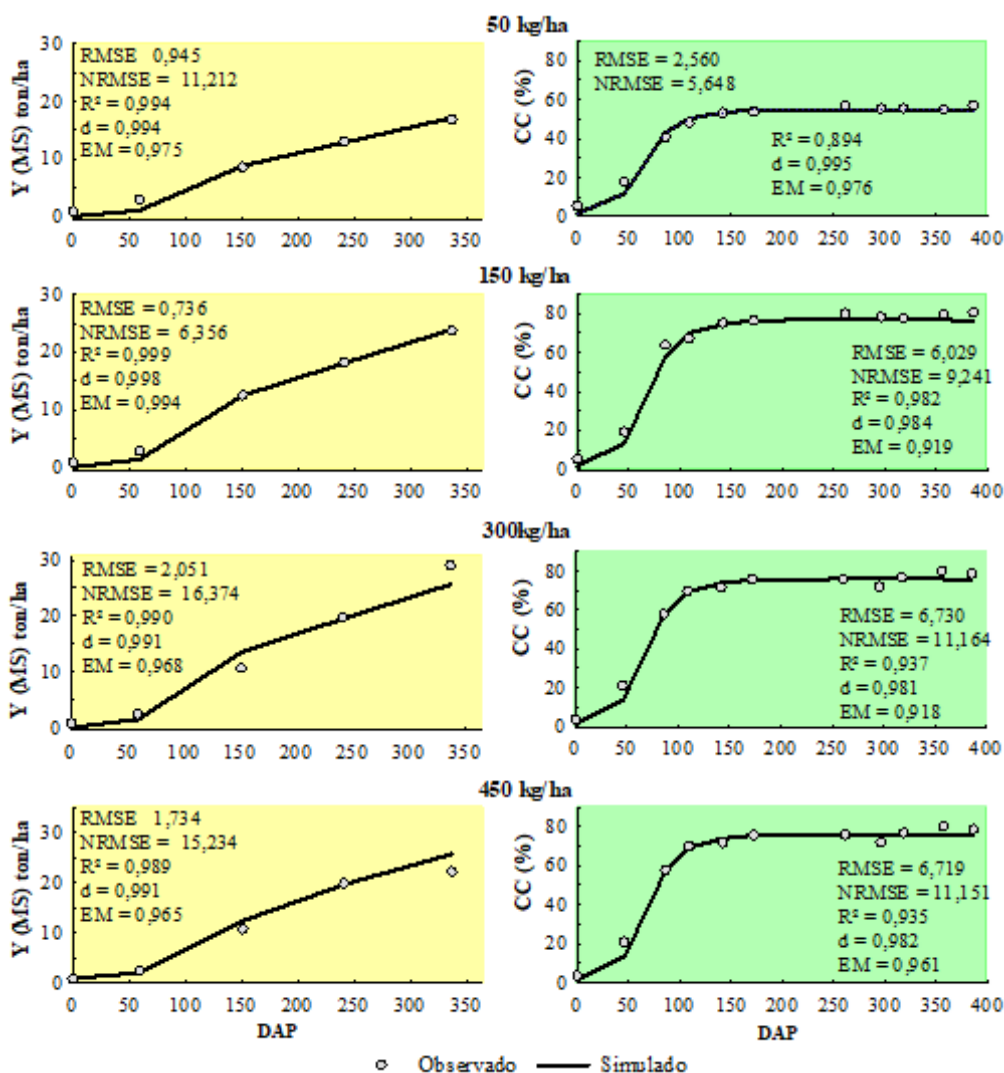


Figura 8. Produtividade e cobertura do dossel (CC) observadas e simuladas, com o AquaCrop, e seus respectivos parâmetros estatísticos obtidos na calibração do modelo para a palma forrageira submetida a adubação com ureia, DAP: dias após plantio.

Na Tabela 16 é possível observar os parâmetros estatísticos para a CCs (Cobertura de dossel simulada) e Ys obtidos no processo de validação. De modo geral, durante a validação do modelo os parâmetros indicaram boa precisão do modelo na simulação da produtividade e da cobertura do dossel. Verificou-se que o coeficiente de determinação (R^2) ficou acima de 0,93 em todos os tratamentos para as duas variáveis simuladas, indicando que o modelo explicou

mais de 95% da relação entre a CCo e CCs, e a Yo e a Ys. O NRMSE indicou “fraca” precisão do modelo para Ys nos níveis 50 e 300 kg ha⁻¹, e indicou “boa” simulação para 150 e 450 kg ha⁻¹. Ademais, os valores de NRMSE ficaram abaixo de 10% para CC nos níveis 50; 150 e 300 kg ha⁻¹, indicando “muito boa” precisão, e entre 10 e 20 no nível 450 kg ha⁻¹ indicando “boa” precisão. O índice “d”, por sua vez, ficou acima de 0,97 para ambas as variáveis em todos os níveis de adubação, exceto Ys do nível 50 kg ha⁻¹, apontando que o AquaCrop conseguiu simular a produtividade e cobertura do dossel da palma com alto grau de confiabilidade. Com relação à eficiência de modelagem (EM), esta ficou acima de 0,90 (ótimo desempenho) para a CCs de todos os níveis de adubação. Para a produtividade, a EM ficou acima de 0,90 para os níveis 150 e 450 kg ha⁻¹, indicando bom desempenho do AquaCrop.

Tabela 16. Parâmetros estatísticos obtidos na avaliação do modelo AquaCrop na simulação da cobertura do dossel (CC) e da produtividade (Ys) (MS,ton/ha) para a palma forrageira submetida a doses de ureia.

Indicador	Adubação com ureia							
	50 kg ha ⁻¹		150 kg ha ⁻¹		300 kg ha ⁻¹		450 kg ha ⁻¹	
	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys	CC	Ys
RMSE	3,788	5,874	4,525	1,874	3,202	3,249	7,006	2,524
R2	0,938	0,969	0,984	0,973	0,989	0,936	0,974	0,940
d	0,991	0,891	0,992	0,991	0,996	0,970	0,982	0,983
EM	0,967	0,687	0,961	0,965	0,986	0,870	0,925	0,921
NRMSE	7,477	46,776	7,503	15,834	5,161	31,753	13,602	16,631

4. DISCUSSÃO

4.1 O MODELO AQUACROP NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA SISTEMAS DE CONSÓRCIO PALMA-SORGO

Desde que o modelo Aquacrop foi lançado, vários estudos buscaram calibrá-lo e validá-lo para culturas diversas. Mkhabela e Bullock (2012) obtiveram precisão aceitável na calibração e validação do modelo AquaCrop para simulação de rendimento de grãos de trigo em uma área do Canadá. Dubey e Sharma (2018) nas condições edafoclimáticas do Rajastão, Índia, calibraram e validaram o modelo para prever o rendimento do milho, do trigo e da cevada sob dois cenários de mudanças climáticas. Abedinpour et al., (2012) obtiveram erro entre 2,5 e 27,5 % na validação do AquaCrop para variáveis de produtividade do milho em um ambiente semiárido da Índia usando dados experimentais de dois anos (2009 e 2010).

Os estudos envolvendo a palma forrageira são bastante evidenciados nas regiões semiáridas ao redor do mundo, sendo essa cultura considerada uma importante espécie para implementação de sistemas de produção de forragem hidricamente eficientes (Diniz et al., 2017). Não obstante são escassos os trabalhos em que se buscou parametrizar o AquaCrop para aplicá-lo a essa cultura. Apesar de para a cultura do sorgo o modelo já ter sido bastante utilizado em diversas partes do mundo (Araya et al., 2016; Hadebe et al., 2017; Starr et al., 2020), mas há uma ausência de trabalhos no sentido de parametrizar o modelo para a cultura em sistemas consorciados.

Nesse sentido, os resultados aqui obtidos mostraram o potencial de utilização para o sistema consorciado palma-sorgo, na medida em que as simulações de biomassa obtidas nos processos de calibração e validação do modelo foram coerentes com os obtidos em campo. Tais resultados corroboram com os encontrados por Alves et al., (2022), os quais obtiveram que o sistema de consórcio entre a palma e o sorgo promove o aumento da produtividade das culturas em relação às culturas individuais. Esse aumento de produtividade pode ser explicado pela capacidade de ambas as culturas se adaptarem a esse sistema de cultivo e de competirem pelos recursos disponíveis, de modo a proporcionar uma otimização na exploração de recursos como água, nutrientes e radiação solar (Brooker et al., 2015; Diniz et al., 2017; Jardim et al., 2021).

Ainda, essa adaptação ao sistema consorciado pode estar relacionada aos seus respectivos metabolismos. Por se tratar de uma planta xerófila, a palma se adapta muito bem a condições áridas e semiáridas. Com relação à palma forrageira, essa adaptação se dá, principalmente, devido ao seu metabolismo fotossintético do tipo CAM (Crassulacean Acid Metabolism), caracterizado pela alta eficiência de uso da água, em especial pelo fato de os estômatos abrirem à noite e fecharem durante o dia e assimilação do CO₂ no período noturno (Scalisi et al., 2016; Alves et al., 2022). O sorgo, por sua vez, possui o metabolismo C₄, sendo o oposto do metabolismo ácido das crassuláceas, e tem a característica fisiológica de interromper ou limitar a atividade metabólica sob déficit hídrico (Santos et al., 2020).

Não obstante a rusticidade e o metabolismo dessas espécies favorecer o sucesso do sistema consorciado, deve-se atentar para buscar os espaçamentos corretos, já que um sistema consorciado muito adensado pode provocar um alto grau de competição entre as culturas, de modo que uma ou outra, ou ambas, não expresse o seu potencial e acabe não proporcionando os benefícios que se espera desse tipo de sistema (Bi et al., 2019; Jardim et al., 2021).

4.2 O MODELO AQUACROP NA CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO PARA FORRAGEIRA PALMA FORRAGEIRA SOB COBERTURA MORTA E SOB ADUBAÇÃO COM UREIA

A precisão do modelo na simulação da biomassa e da cobertura do dossel pode ter sido afetada pelo fato de o modelo tender a subestimar a biomassa na fase inicial do ciclo da cultura, o que pode ter contribuído para que em alguns tratamentos (sem aplicação de cobertura morta) alguns testes estatísticos tenham indicado fraca modelagem como, por exemplo, NRMSE superior a 30; EM menor que 0. Uma razão para isso, pode se dar devido a palma forrageira possuir significativa biomassa inicial, em função do próprio material vegetativo plantado, desse modo

O modelo conseguiu inferir maior produtividade de água para o maior nível de cobertura. É sabido que a maior espessura da camada de cobertura morta sobre o solo permite manter por mais tempo o conteúdo de água no solo (Zhang et al., 2020). Além disso a cobertura morta possibilita aumentar quantidade de matéria orgânica do solo, favorecendo o aumento da umidade na capacidade de campo, bem como reduzindo a emergência de plantas daninhas (Xiukang et al., 2015). Isso tudo, induz um efeito sinérgico, de modo que a planta se desenvolva melhor e consiga ser eficiente no aproveitamento dos recursos (água, nutriente, luz) disponíveis e, conseqüentemente, com maiores produtividades (Yin et al., 2018).

Cabe ressaltar que a produtividade da água (WP) faz parte de duas das principais equações que integram o AquaCrop, sendo que uma determina a biomassa e a outra a produtividade da cultura. Nesse sentido, mostram-se coerentes os resultados, visto que já é consolidado que o consórcio entre culturas ou a adubação nitrogenada induz a ganhos nos índices de eficiência no uso da água e dos demais recursos disponíveis, como luz e nutrientes, consistindo em importantes técnicas hídricas para regiões semiáridas (Nyakudya e Stroosnijder, 2014; Alves et al., 2022).

Embora não haja ainda trabalhos publicados em que se buscou calibrar e validar o modelo para a palma forrageira, percebeu-se que, com base nos indicadores estatísticos (RMSE, EM, “d” e R^2), que o modelo foi eficiente na simulação da produtividade e da CC da espécie estudada. Ressalte-se, ainda, que, apesar de o modelo não ter sido projetado para simulação da produtividade de plantas CAM, os resultados mostram o potencial de sua utilização para a palma forrageira irrigada em diferentes sistemas.

Um dos fatores que pode justificar o êxito da utilização do AquaCrop para a palma irrigada se dá ao fato de que quando em condições de boa disponibilidade hídrica ela aciona o

metabolismo CAM-facultativo (Alves et al., 2020), de modo a realizar a abertura estomática e assimilação diurna de CO₂, como uma planta de metabolismo C3 (Yu et al., 2017). Além disso, frise-se que o modelo AquaCrop permite a simulação de vegetais folhosos, ou seja, aqueles em que há o corte, a planta se restabelece possibilitando múltiplas colheita. Nessa linha, Nyathi et al., (2018) obtiveram para vegetais folhosos [*Amaranthus cruentus* (amaranto), *Cleome gynandra* (flor-aranha) e *Beta vulgaris* (acelga suíça)] em Pretória, África do Sul, colhidos repetidamente, bons parâmetros durante a calibração e validação do modelo AquaCrop. Os autores constataram valores de $0,60 < R^2 < 0,99$; $0,94 < RMSE < 5,44$ na simulação da CC e da produtividade da água das espécies.

5. CONCLUSÕES

Apesar de o modelo AquaCrop ter sido projetado para plantas de metabolismos C3 e C4, com alguns ajustes, ele pode ser adotado na simulação da biomassa do clone de palma orelha de elefante mexicana, seja em sistemas exclusivos, ou consorciados.

Os sistemas mais adensados apresentaram os maiores valores de produtividade de água calibrados.

Embora ainda não haja para a palma forrageira a parametrização do AquaCrop estabelecida e publicada os resultados obtidos nessa pesquisa são importantes para as futuras pesquisas que venham a ser realizados com intuito de difundir o AquaCrop para a palma forrageira, ou outras culturas de grande potencial forrageiro para regiões semiáridas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., e 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., Adekalu, K. O., e 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(January), 1130–1146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.11.006>
- Akumaga, U., Tarhule, A., e 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>
- Allen, R. G. (2006). *FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by*. 56.
- Álvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., e 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>
- Alves, C. P., Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Souza, L. S. B. de, Araújo, G. G. L. de, Souza, C. A. A. de, Salvador, K. R. da S., Leite, R. M. C., Pinheiro, A. G., e Silva, T. G. F. da. (2022). How to enhance the agronomic performance of cactus-sorghum intercropped system: planting configurations, density and orientation. *Industrial Crops and Products*, 184(May). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115059>
- Alves, F. A. L., Santos, D. C. S., Sérvulo, D. C., Silva, M. C., e Mello, D. R. (2020). Metabolismo fotossintético de variedades de palma forrageira cultivadas no Semiárido brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, 25(2), 1–12. <https://doi.org/10.12661/pap.2020.009>
- Andrade, A. S., Santos, P. M., Pezzopane, J. R. M., de Araujo, L. C., Pedreira, B. C., Pedreira, C. G. S., Marin, F. R., e Lara, M. A. S. (2016). Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: An overview of model development and application. *Grass and Forage Science*, 71(1), 54–65. <https://doi.org/10.1111/gfs.12177>
- Araya, A., Kisekka, I., e Holmam, 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., e 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>
- Bello, Z. A., e Walker, S. (2017). Evaluating AquaCrop model for simulating production of amaranthus (*Amaranthus cruentus*) a leafy vegetable, under irrigation and rainfed conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247(February), 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.003>
- Bi, Y., Zhou, P., Li, S., Wei, Y., Xiong, X., Shi, Y., Liu, N., e Zhang, Y. (2019). Interspecific interactions contribute to higher forage yield and are affected by phosphorus application in a fully-mixed perennial legume and grass intercropping system. *Field Crops Research*, 244(October), 107636. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107636>
- Brooker, R. W., Bennett, A. E., Cong, W. F., Daniell, T. J., George, T. S., Hallett, P. D., Hawes, C., Iannetta, P. P. M., Jones, H. G., Karley, A. J., Li, L., Mckenzie, B. M., Pakeman, R. J., Paterson, E., Schöb, C., Shen, J., Squire, G., Watson, C. A., Zhang, C., ... White, P. J. (2015). Improving intercropping: A synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytologist*, 206(1), 107–117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>
- Cavalcanti, F. J. de A. (2008). *Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: segunda aproximação* (p. 212). <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=adeid=32088ebiblioteca=vazioebusca=autoria:%22CAVALCANTI,F.J.deA.%22eqFacets=autoria:%22CAVALCANTI,F.J.deA.%22esort=epaginacao=tepaginaAtual=1>
- Chibarabada, T. P., Modi, A. T., e Mabhaudhi, T. (2020). Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281(November 2019), 107850. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107850>
- da Silva, L. M., Fagundes, J. L., Viegas, P. A. A., Muniz, E. N., Rangel, J. H. de A., Moreira, A. L., e Backes, A. A. (2014). Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. *Ciencia Rural*, 44(11), 2064–2071. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20131305>
- Diniz, W. J. da S., da Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. da S., dos Santos, D. C., de Moura, M. S. B., de Araújo, G. G. L., e Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semi-arid Region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 52(9), 724–733. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>

- Dubey, S. K., e Sharma, D. (2018). Assessment of climate change impact on yield of major crops in the Banas River Basin, India. *Science of the Total Environment*, 635(2018), 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.343>
- García Á., J., Riaño H., N., e Magnitskiy, S. (2014). Simulación de la producción de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes zonas agrícolas de Colombia con el modelo AquaCrop. *Agronomía Colombiana*, 32(3), 358–366. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n3.45939>
- Hadebe, S. T., Modi, A. T., e Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. *Water SA*, 43(2), 209–221. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i2.05>
- Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., e Steduto, P. (2009). Validating the FAO aquacrop model for irrigated and water deficit field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488–498. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0029xs>
- Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F. da, Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. de S., Araújo, G. G. L. de, e Moura, M. S. B. de. (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. L., Feng, H. K., Zhu, X. K., Li, Z. H., Song, S. N., Song, X. Y., Yang, G., Xu, X. G., e Guo, W. S. (2014). Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China plain. *PLoS ONE*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086938>
- Liu, X., Andresen, J., Yang, H., e Niyogi, D. (2015). Calibration and validation of the hybrid-maize crop model for regional analysis and application over the U.S. corn belt. *Earth Interactions*, 19(9), 1–16. <https://doi.org/10.1175/EI-D-15-0005.1>
- Malik, W., Boote, K. J., Hoogenboom, G., Cavero, J., e Dechmi, F. (2018). Adapting the CROPGRO model to simulate alfalfa growth and yield. *Agronomy Journal*, 110(5), 1777–1790. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0680>
- McGeorge, W. T. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 18(3), 348. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>
- Mkhabela, M. S., e Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.03.009>
- Nash, E., e Sutcliffe, V. (1970). *PART I- A DISCUSSION OF PRINCIPLES * The problem of determining river flows from rainfall , evaporation , and other factors , occupies a central place in the technology of applied hydrology . It is not only the essential problem of flood forecasting but a*. 10, 282–290.
- Nunes, H. G. G. C., Sousa, D. de P., Moura, V. B., Ferreira, D. P., Pinto, J. V. de N., de Oliveira Vieira, I. C., Farias, V. D. da S., Oliveira, E. C. de, e de Souza, P. J. de O. P. (2019). Performance of the AquaCrop model in the climate risk analysis and yield prediction of cowpea (*Vigna Unguiculatta* L. Walp). *Australian Journal of Crop Science*, 13(7), 1105–1112. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1590>
- Nyakudya, I. W., e 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>
- Nyathi, M. K., van Halsema, G. E., Annandale, J. G., e Struik, P. C. (2018). Calibration and validation of the AquaCrop model for repeatedly harvested leafy vegetables grown under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 208(October 2017), 107–119.

- <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.012>
- Pinheiro, K. M., da Silva, T. G. F., de Sousa Carvalho, H. F., Santos, J. E. O., de Moraes, J. E. F., Zolnier, S., e dos Santos, D. C. (2014). Correlações do índice de área do cladódio com características morfológicas e produtivas da palma forrageira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49(12), 939–947. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200004>
- Pirmoradian, N., e Davatgar, N. (2019). Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 213(October 2018), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003>
- Queiroz, M. G. DE, Silva, T. G. F. da, Zolnier, S., Silva, S. M. S. e, Souza, C. A. A. de, e Carvalho, H. F. de S. (2018). Relações Hídrico-Econômicas Da Palma Forrageira Cultivada Em Ambiente Semiárido. *Irriga*, 1(01), 141. <https://doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p141-154>
- Rackl, M., e Hanley, K. J. (2017). A methodical calibration procedure for discrete element models. *Powder Technology*, 307, 73–83. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.11.048>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., e Fereres, E. (2012). AquaCrop Reference Manual - AquaCrop Version 4.0. *User Manual*, June, 1–17. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&eq=intitle:AquaCrop+Reference+Manual#0>
- Rashid, M. A., Jabloun, M., Andersen, M. N., Zhang, X., e Olesen, J. E. (2019). Climate change is expected to increase yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 222(January), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.06.004>
- Saad, A. M., Mohamed, M. G., e El-Sanat, G. A. (2014). Evaluating AquaCrop model to improve crop water productivity at North Delta soils, Egypt. *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research*, 5(5), 293–304. www.pelagiaresearchlibrary.com
- Santos, F. D. A., e Aquino, C. M. S. (2017). PANORAMA DA DESERTIFICAÇÃO NO NORDESTE DO BRASIL: características e suscetibilidades. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, 2(7), 144. <https://doi.org/10.18764/2446-6549.v2n7p144-161>
- Santos, G. C. L., Garcia, P. H. M., Viana, T. B. L., Borges, P. F., Araujo, L. S., e Gonzaga, S. (2020). Crescimento e eficiência do uso da água do sorgo sob distintos regimes hídricos contínuos. *Archivos de Zootecnia*, 69(266), 164–171. <https://doi.org/10.21071/az.v69i266.5111>
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreas, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araújo Filho, J. C., Oliveira, J. B., e Cunha, T. J. F. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos. In *Embrapa Solos*. <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>
- Scalisi, A., Morandi, B., Inglese, P., e Lo Bianco, R. (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>
- Starr, M., Deng, B., e Helenius, J. (2020). Aquacrop-simulated response of sorghum biomass and grain yield to biochar amendment in South Sudan. *Agronomy*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy10010067>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., e 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>
- Tavakoli, A. R., Mahdavi Moghadam, M., e Sepaskhah, A. R. (2015). Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management*, 161, 136–146. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.020>

- Tinôco, I. C. M., Bezerra, B. G., Lucio, P. S., e Barbosa, L. de M. (2018). Characterization of rainfall patterns in the semiarid Brazil. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 41(2), 397–409. https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409
- Watt, L. J., Bell, L. W., e Pembleton, K. G. (2022). A forage brassica simulation model using APSIM: Model calibration and validation across multiple environments. *European Journal of Agronomy*, 137, 126517. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126517>
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin - 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)
- Xiukang, W., Zhanbin, L., e Yingying, X. (2015). Effects of mulching and nitrogen on soil temperature, water content, nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 161, 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.019>
- Yin, W., Yu, A., Guo, Y., Wang, Y., Zhao, C., Fan, Z., Falong, H., e Chai, Q. (2018). Straw retention and plastic mulching enhance water use via synergistic regulation of water competition and compensation in wheat-maize intercropping systems. *Field Crops Research*, 229(March), 78–94. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.003>
- Yu, K., D’Odorico, P., Carr, D. E., Personius, A., e Collins, S. L. (2017). The effect of nitrogen availability and water conditions on competition between a facultative CAM plant and an invasive grass. *Ecology and Evolution*, 7(19), 7739–7749. <https://doi.org/10.1002/ece3.3296>
- Zhang, P., Wei, T., Han, Q., Ren, X., e Jia, Z. (2020). Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China. *Agricultural Water Management*, 241(June), 106382. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106382>

CAPÍTULO III

O AQUACROP NA SIMULAÇÃO DO CALENDÁRIO AGRÍCOLA PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

O AQUACROP NA SIMULAÇÃO DO CALENDÁRIO AGRÍCOLA PARA SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

Diante da sazonalidade espaço-temporal da produção de forragens no semiárido do Brasil, é relevante buscar estratégias para atender a demanda por alimentos dos rebanhos dessa região. Além disso, considerando as características fisiográficas do semiárido brasileiro e seu contexto de riscos de desertificação, escolher o tipo de sistema de produção de forragem e a sua melhor época de plantio/installação é de suma importância para obter maiores produtividades, ainda mais quando se considera a sazonalidade temporal das precipitações dessa região. Nesse sentido, de posse do modelo AquaCrop-FAO, calibrado e avaliado sob as condições semiáridas de Serra Talhada-PE para sistemas hidricamente produtivos envolvendo o cultivo da palma forrageira “Orelha de Elefante Mexicana (OEM)” — *Opuntia stricta* (Haw.), objetivou-se fazer simulações para recomendações do calendário agrícola para áreas com risco de desertificação do Semiárido brasileiro, de modo a fornecer soluções para otimização do aporte forrageiro. Simulou-se cinco sistemas de produção de forragem envolvendo o clone OEM em arranjos em consórcio com a cultura do sorgo sob densidades de plantio, sob adubação com ureia, e sob aplicação de cobertura morta no solo, nas condições de sequeiro e irrigado. Os sistemas foram simulados para as condições agroambientais de oito municípios inseridos no Semiárido, quais sejam: Arcoverde-PE, Garanhuns-PE, Monteiro-PB, Surubim-PE, Petrolândia-PE, Petrolina-PE, Paulistana-PI, Serra Talhada-PE. Dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período 1961-2018 serviram de base para geração dos cenários. Foram feitas simulações de plantio/implementação dos sistemas para o 15º dia dos 12 meses do ano. Os dados de granulometria do solo que serviram para elaboração dos arquivos de solo para esses municípios foram obtidos por meio da plataforma PronaSolos (Programa Nacional de Solos do Brasil). Além disso, utilizou-se o software SPAW, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA, para estimar parâmetros físico-hídricos dos solos dos municípios estudados. Em síntese, o plantio no mês de novembro se mostrou a melhor época de plantio/implementação dos sistemas sob condições irrigadas. Verificou-se que os sistemas consorciados mais adensados (em especial o arranjo 0,10 m × 1,25 m) foram os mais produtivos em condições irrigadas para a maioria dos municípios. Para a maioria dos municípios estudados recomenda-se o plantio da palma entre os meses de outubro e janeiro sob irrigação. Nas condições de sequeiro, o uso da cobertura morta surgiu como uma maneira paliativa para manter bons níveis de produtividade para a palma na maioria dos pontos estudados para os meses de março a maio, em que pese não substitua a irrigação. Embora haja muito a progredir com os estudos de modelagem voltado para a palma forrageira, o AquaCrop se mostrou aplicável a essa cultura, seja em sistemas exclusivos, seja em sistemas consorciados com o sorgo. Desse modo o modelo consiste em uma ferramenta de tomada de decisão e de avaliação de estratégias para a produção de forragem no Semiárido do Brasil.

Palavras-chave: Modelagem matemática; *Opuntia stricta*; técnicas hídricas; zoneamento agrícola

AQUACROP IN THE RECOMMENDATION OF THE AGRICULTURAL CALENDAR FOR FORAGE PRODUCTION SYSTEMS IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID

ABSTRACT

In view of the spatial-temporal seasonality of forage production in the semi-arid region of Brazil, it is relevant to seek strategies to meet the demand for food by the livestock of this region. Moreover, considering the physiographic characteristics of the Brazilian semi-arid region and its context of desertification risks, choosing the type of forage production system and its best planting/installation season is of utmost importance to obtain higher productivity, even more so when considering the temporal seasonality of precipitation in this region. In this sense, with the AquaCrop-FAO model, calibrated and evaluated under semi-arid conditions of Serra Talhada-PE for hydrologically productive systems involving the cultivation of forage palm "Mexican Elephant's Ear (OEM)" - *Opuntia stricta* (Haw.), the objective was to carry out simulations for recommendations of the agricultural calendar for areas with risk of desertification in the Brazilian semi-arid region, in order to provide solutions for optimization of forage supply. Five forage production systems were simulated involving the OEM clone in intercropping arrangements with sorghum under planting densities, under urea fertilization, and under the application of soil mulch, in rainfed and irrigated conditions. The systems were simulated for the agro-environmental conditions of eight municipalities inserted in the semi-arid region, namely: Arcoverde-PE, Garanhuns-PE, Monteiro-PB, Surubim-PE, Petrolândia-PE, Petrolina-PE, Paulistana-PI, Serra Talhada-PE. Meteorological data from the National Meteorological Institute (INMET) for the period 1961-2018 served as a basis for generating the scenarios called "average year" for all municipalities. Simulations of planting/implementation of the systems were made for the 15th day of the 12 months of the year. The soil granulometry data that served for the elaboration of the soil files for these municipalities were obtained by means of the PronaSolos platform (Brazilian National Soil Program). Furthermore, the SPAW software of the United States Department of Agriculture - USDA, was used to estimate physical and hydric parameters of the soils of the municipalities studied. In summary, planting in the month of November proved to be the best time for planting/implementing the systems under irrigated conditions. It was found that the most densely packed intercropping systems (especially the 0.10 m × 1.25 m arrangement) were the most productive under irrigated conditions for most municipalities. For most of the studied municipalities it is recommended that oil palm be planted between the months of October and January under irrigation. In rainfed conditions, the use of mulching emerged as a palliative way to maintain good yield levels for oil palm in most of the studied sites for the months of March to May, although it does not replace irrigation. Although there is much progress to be made in modelling studies of the forage palm, AquaCrop proved to be applicable to this crop, either in exclusive systems or in intercropping systems with sorghum. Thus, the model is a tool for decision making and for the evaluation of strategies for forage production in the semi-arid region of Brazil.

Keywords: Modeling; *Strict opuntia*; water technologies; agricultural zoning

1. INTRODUÇÃO

Considerando as particularidades ambientais que prevalecem no semiárido do Brasil, como a irregularidade da distribuição espaço-temporal da precipitação e por predominantemente apresentar áreas que possuem riscos de desertificação, é primordial estudar estratégias que possam auxiliar a sustentabilidade do setor agropecuário frente aos possíveis cenários ambientais mais desafiadores para essa região (Vieira et al., 2015a; Costa et al., 2021; Cruz Neto et al., 2021). Entre essas estratégias destaca-se a recomendação do calendário agrícola, isto é, a determinação da melhor época do ano para implementação de um cultivo. Ao encontro disso, as simulações de rendimento por meio da modelagem matemática consistem em uma importante ferramenta para buscar estratégias de adaptação do setor agrícola para os mais diversos cenários (Iqbal et al., 2014; Mhizha et al., 2014; Lu et al., 2017; Vieira et al., 2021b).

O semiárido brasileiro possui uma área aproximada de 1,03 milhões de km², abrangendo, em especial, o Nordeste do país. Em decorrência da sua posição latitudinal, a região apresenta elevadas taxas de insolação e de evapotranspiração potencial e valores de temperatura média que variam entre 26 e 28 °C. Também apresenta índices pluviométricos entre 600 e 800 mm anual (Tinôco et al., 2018), sendo, em alguns pontos, até 90% da precipitação é concentrada em até quatro meses do ano (dezembro a março) (Costa et al., 2021). Assim, para essa região o início do cultivo no período apropriado é fundamental para otimizar o uso dos recursos agroambientais, para favorecer o desenvolvimento adequado da espécie, para evitar estresses térmicos e hídricos nos principais estágios da cultura e, portanto, para proporcionar a obtenção de melhores rendimentos de biomassa (Zhang et al., 2019).

Embora vários autores ao redor do mundo pareçam ter consenso sobre a importância da data de plantio (Nyakudya e Stroosnijder, 2014; Kumar et al., 2021; Mugiyo et al., 2021) ainda são incipientes estudos sobre o calendário agrícola de culturas forrageiras (palma forrageira, sorgo) para o semiárido brasileiro, sendo limitado ao Zoneamento Agrícola de Risco Climático do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. São mais escassos ainda estudos nos quais se aplica o modelo AquaCrop FAO para analisar melhores épocas de implementação de determinados sistemas de produção de forragem, por exemplo com a utilização da palma forrageira, seja em sistema de plantio consorciado, seja com o uso de cobertura morta no solo ou o aumento da densidade de plantio.

No âmbito da modelagem de culturas agrícolas, o modelo AquaCrop-FAO é uma das principais ferramentas (Andrade et al., 2016). Trata-se de um software gratuito desenvolvido

em 2009 pela Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Ele foi projetado para assessorar na gestão da produção agrícola no que tange ao efeito da água. Nesse quesito, o AquaCrop permite uma modelagem do crescimento e rendimento das culturas agrícolas em função da cobertura do dossel ao adotar a água como um fator limitante, e assim simula a produtividade real e a produtividade da água (Akumaga et al., 2017).

Ademais, já é consolidado que o modelo AquaCrop-FAO é uma ferramenta de apoio a tomada de decisão e planejamento agrícola, na medida em que possibilita ser usado para avaliar diferentes manejos na simulação da biomassa (Jin et al., 2014). Além do AquaCrop, outros modelos de simulação de culturas como CERES, CSM-CROPGRO e APSIM (Watt et al., 2022) foram aplicados para as mais variadas culturas (Andrade et al., 2016) (Malik et al., 2018). Todavia, em que pese esses modelos possam ser usados para determinar datas de plantio, geralmente são modelos complexos e que requerem um grande número de variáveis e parâmetros de entrada que nem sempre estão facilmente disponíveis, portanto, raramente são utilizados por agricultores, extensionistas e planejadores (Raes et al., 2012). Em contraste, o AquaCrop se destaca por ser um modelo que, ao passo que é robusto, visto que permite entradas de dados de manejo, cultura, clima e solo, é simples e intuitivo de se aplicar (Steduto et al., 2011).

Com efeito, o uso da simulação por meio da modelagem matemática tem crescido, visto a grande preocupação dos pesquisadores em tentar inferir sobre os possíveis impactos que as alterações do clima provocarão nas mais diversas culturas agrícolas. A adoção de técnicas sustentáveis na agricultura torna-se necessária, logo que, embora haja dificuldades em se projetar o clima com precisão a longo prazo, vários estudos se alinham na concepção de que os sistemas de produção agrícola são particularmente sensíveis às alterações do clima, de modo a gerar incertezas sobre a segurança alimentar futura (Rosenzweig et al., 2014; Parker et al., 2019).

Objetivou-se, portanto, aplicar o modelo AquaCrop-FAO para verificar o comportamento da produtividade de distintos sistemas de produção de forragem, envolvendo a palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, de acordo com a época de plantio/implementação, de modo a recomendar melhores épocas de plantio para distintos pontos do semiárido do Brasil, com a finalidade de diminuir a lacuna de forragens para essa região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCAIS DE ESTUDO E DADOS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO

De posse do modelo AquaCrop calibrado e avaliado, conforme demonstrado no Capítulo II, procedeu-se com a aplicação do modelo no sentido de simular a produtividade (biomassa seca) dos sistemas de produção de forragem para municípios inseridos no Semiárido do Brasil (Figura 1). As simulações de época de plantio para cinco sistemas de produção de forragem foram feitas para os municípios de Arcoverde-PE, Garanhuns-PE, Monteiro-PB, Surubim-PE, Petrolina-PE, Petrolândia-PE, Paulistana-PI, Serra Talhada-PE (Figura 1).

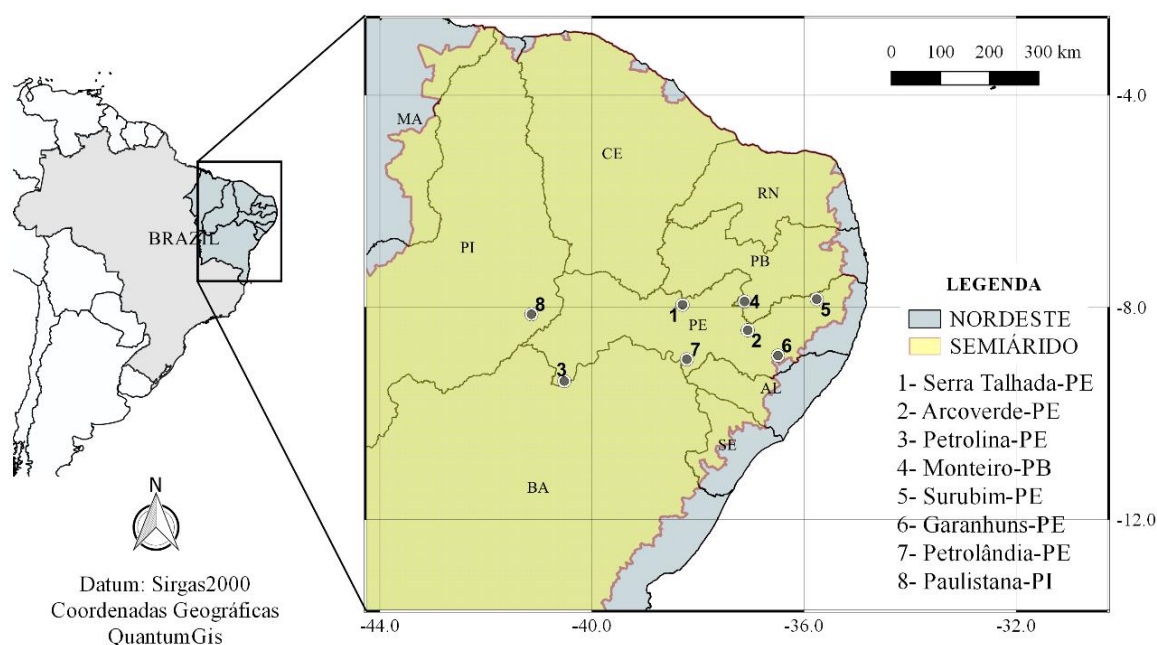


Figura 1. Localização dos municípios inseridos no semiárido para os quais foram feitas simulações de sistemas de produção de forragem com o modelo AquaCrop.

2.2 SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE FORRAGEM UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

Os sistemas aplicados envolveram o clone de palma forrageira “Orelha de Elefante Mexicana (OEM)” — *Opuntia stricta* (Haw). Nesse aspecto as simulações foram: diferentes espaçamentos de plantio da palma em consórcio com o sorgo (*Sorghum bicolor*) cultivar IPA-467, palma sob cobertura morta e palma sob adubação nitrogenada com ureia. Na Tabela 1 encontra-se o resumo dos arranjos aplicados para a simulação no AquaCrop.

Tabela 1. Condições e arranjos agrícolas, aplicados nas simulações de produção de biomassa para as distintas localidades da região semiárida brasileira

Sistema	Reposição hídrica	Arranjo	Densidade (plantas ha ⁻¹)
Diferentes espaçamentos entre plantas para palma forrageira em consórcio com sorgo I	80 % da ETc da palma	0,10 m x 1,00 m	Palma - 100.000; Sorgo - 200.000
	Sequeiro		
	80 % da ETc da palma	0,20 m x 1,00 m	Palma - 50.000; Sorgo - 200.000
	Sequeiro		
Diferentes espaçamentos entre plantas para palma forrageira em consórcio com sorgo II	80 % da ETc da palma	0,10 m x 1,25 m	Palma - 80.000; sorgo - 160.000
	Sequeiro		
	80 % da ETc da palma	0,2 m x 1,25 m	Palma - 40.000; sorgo - 160.000
	Sequeiro		
Diferentes espaçamentos entre linhas de cultivo para palma forrageira consorciada com o sorgo	80 % da ETc da palma	1,00 x 0,20 m	Palma - 40.000; Sorgo - 200.000
	Sequeiro		
	80 % da ETc da palma	1,50 x 0,20 m	Palma - 33.333; Sorgo - 133.333
	Sequeiro		
Palma com e sem aplicação de cobertura morta no solo	80 % da ETc da palma	Sem aplicação	Palma - 50.000
	Sequeiro		
	80 % da ETc da palma	15 ton ha ⁻¹	
	Sequeiro		
Palma sob adubação com ureia	80 % da ETc da palma	50 ton ha ⁻¹	Palma - 40.000
	Sequeiro		
	80 % da ETc da palma	150 ton ha ⁻¹	
	Sequeiro		

2.3 MODELO AQUACROP E SEUS PARÂMETROS DE ENTRADA

O modelo AquaCrop é um software desenvolvido pela Divisão de Terra e Água da FAO em 2009. Ele é disponibilizado de maneira gratuita, podendo ser feito download pelo site: “<http://www.fao.org/AquaCrop/en/>”. Atualmente está na versão 6.1 e propõe uma modelagem do rendimento de culturas agrícolas com simulação de crescimento e determinação da produtividade real em função da cobertura do dossel, adotando a água como um fator limitante, com a finalidade de auxiliar a gestão e produção agrícola em relação ao efeito da água sobre a produção (Foster et al., 2017) . O modelo usa entradas separadas para os componentes climáticos (chuva, evapotranspiração e temperaturas máximas e mínima); parâmetros de cultivo; manejo (irrigação e campo); e solo (características físicas e capacidade de armazenamento) para simulação. A simulação diária do desenvolvimento e crescimento da cultura no AquaCrop é integrada ao balanço hídrico do solo, que fornece uma plataforma robusta e precisa para modelar diferentes cenários de manejo agrícola com a água sendo um fator limitante na produção (Steduto et al., 2009; Dubey e Sharma, 2018).

2.3.1 Parâmetros de clima

Os dados meteorológicos para os municípios foram obtidos por meio do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022). As séries históricas com informações diárias foram referentes ao período de 1961 a 2018, oriundas de coletas convencionais. Para o município de Serra Talhada-PE, no qual foi realizado os experimentos de campo e obtido os dados agrometeorológicos para calibração e validação do modelo, o período de dados foi de 2011 a 2020, oriundo de estação automática.

De posse dos dados, procedeu-se a elaboração do que se denominou de “ano médio” para todas as variáveis [chuva, temperaturas máxima e mínima, e evapotranspiração de referência, sendo esta calculada pelo método de Penman-Monteith (FAO)] (Allen, 2006). O ano médio consistiu no cálculo da média da respectiva variável para todos os dias ao longo de todos os anos do período. Na Figura 2 encontra-se as informações que serviram como entrada no compartimento de clima do AquaCrop para os municípios estudados.

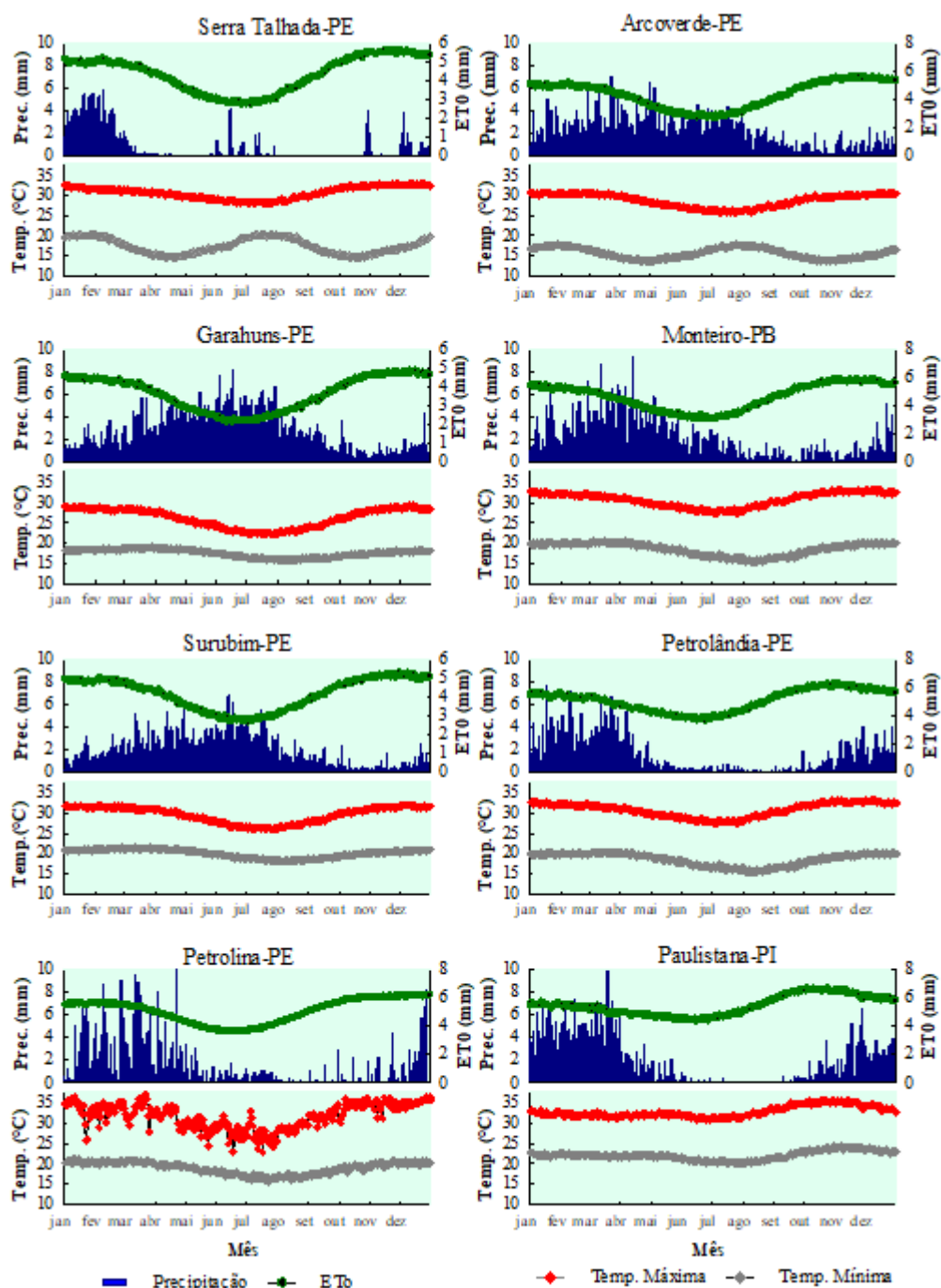


Figura 2. Distribuição das médias históricas diárias das variáveis meteorológicas temperaturas máxima e mínima (°C), precipitação (mm) e evapotranspiração de referência – ET0 (mm) para os municípios estudados.

Na Tabela 2 verifica-se as informações meteorológicas média dos municípios estudados. Verificou-se precipitação média entre 426 (Petrolina-PE) e 895 mm (Garanhuns); temperatura mínima média entre 17,52 °C (Garanhuns-PE) e 22,09 °C (Petrolândia-PE); temperatura máxima média variando entre 26,25 °C e 32,93°C e ET0 média entre os municípios entre 3,64 mm e 5,48 mm.

Tabela 2. Precipitação média acumulada anual, temperaturas máxima e mínima média, e evapotranspiração de referência (ET0) para os municípios estudados

Cidade	Prec. (mm)	Tmax med (°C)	Tmin med (°C)	ET0 (mm)
Serra Talhada-PE	526,71	32,32	20,84	4,82
Arcoverde-PE	640,22	29,63	18,53	4,37
Garanhuns-PE	895,64	26,25	17,52	3,64
Monteiro-PB	654,03	30,87	18,53	4,64
Surubim-PE	636,77	29,63	20,02	4,19
Petrolândia-PE	471,20	32,43	22,09	5,11
Petrolina-PE	426,28	31,81	18,93	5,10
Paulistana-PI	583,96	32,93	22,08	5,48

2.3.2 Parâmetros de solo

Informações acerca da granulometria dos solos dos municípios estudados, exceto para Serra Talhada-PE, foram coletadas no site do Pronasolos — Programa Nacional de Solos do Brasil — (<https://geoportal.cprm.gov.br/pronasolos/>). Tais informações serviram para estimar, com o software Spaw-Hidrology (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA), as informações físico-hídricas (ponto de murcha, umidade da capacidade de campo, condutividade hidráulica saturada, água disponível) para os respectivos solos de cada município (Tabela 3). Para o município de Serra Talhada-PE, os dados foram oriundos de análises físico-químicas realizadas no âmbito da condução dos sistemas de produção de forragem.

Tabela 3. Informações de entrada de solo no modelo AquaCrop para os municípios em que foi aplicado o AquaCrop

Informações de solo para Serra Talhada-PE								
Horizonte		Características dos horizontes do solo						
		PMP %	CC %	Ksat (mm dia ⁻¹)	TAD (mm/m)			
1 (0-10 cm)		3,9	10,1	42,7	58,0			
2 (10-20 cm)		4,5	10,6	38,8	59,0			
3 (20-30 cm)		4,5	10,8	52,0	61,0			
4 (30-40 cm)		5,1	11,4	33,9	63,0			
5 (40-70 cm)		6,0	17,4	31,4	113,0			
Informações de solo para os demais municípios								
Municípios	Prof. (m)	Argila (%)	Areia (%)	M.O	PM (%)	CC (%)	Ksat (mm dia ⁻¹)	TAD (mm m ⁻¹)
Arcoverde-PE	0,7	8,0	73,0	1,05	5,0	13,1	1431,6	81,0
Petrolina-PE	1,5	21,0	53,0	0,22	2,2	6,0	1083,8	119,0
Monteiro-PB	0,9	33,0	41,0	4,02	21,5	34,6	151,2	131,0
Surubim-PE	1,5	4,0	88,0	0,72	2,4	7,2	2743,2	48,0
Garanhuns-PE	1,9	58,0	33,0	2,38	21,3	35,0	448,3	64,0
Petrolândia-PE	1,5	4,0	93,0	0,62	2,2	6,0	3010,5	48,0
Paulistana-PI	1,0	23,0	56,0	2,14	15,2	25,9	313,3	108,0

Ksat: Condutividade hidráulica na condição saturada; TAD: teor de água disponível; CC: umidade na capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; M.O: matéria orgânica; TAD: teor de água disponível.

2.3.3 Parâmetros de cultura

Os parâmetros específicos que serviram como entrada foram previamente parametrizados (Capítulo II) para cada arranjo, conforme exposto nas Tabelas 4 e 5. Na Tabela 4 encontra-se os parâmetros para os sistemas exclusivos, enquanto que na Tabela 5 para os consorciados.

Tabela 4. Parâmetros utilizados no AquaCrop para simulação da produtividade dos diferentes sistemas produção para palma forrageira

Parâmetros	Cobertura morta		Adubação (Ureia)	
	S.A	5 ton ha ⁻¹	50 kg ha ⁻¹	150 kg ha ⁻¹
Densidade de plantio (plantas m ⁻²)	5,0	5,0	3,2	3,2
Cobertura inicial do dossel (%)	1.25	1.25	1,6	1,6
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	2.4	2.8	4,1	4,2
Máx. desenvolvimento do dossel (%)	53	54	59	77
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3.1	3.1	3	3
Emergência (DAP)	15	15	0	0
Máx. desenvolvimento do dossel (DAP)	275	240	145	145
Início da senescência (DAP)	362	362	386	386
Início da floração (DAP)	362	362	386	386
Profundidade da raiz (m)	0.7	0.7	0,7	0,7
Profundidade máxima da raiz (DAP)	112	112	255	245
Max. Evapotranspiração da cultura (kc)	0.52	0.52	0,52	0,52
Redução com o tempo (% dia ⁻¹)	NC	NC	NC	NC
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25
Fator de forma	NC	NC	NC	NC
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	15.8	30.2	26,9	32,3
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100
Função de expansão do dossel				
p-superior	0.32	0.50	0,45	0,5
p-inferior	0.7	0.80	0,75	0,8
Forma da curva	3.50	6.00	6	6
Função de fechamento estomático				
p-superior	0.72	0.80	0,75	0,8
Forma da curva	3.30	4.50	4	4,5
Função de senescência no dossel precoce				
p-superior	0.80	0.80	0,8	0,8
Forma da curva	4.50	4.50	4,5	4,5
Efeito da fertilidade do solo	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	20	20	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40
Cobertura do solo por cobertura morta	0%	100%	NC	NC

NC: não considerado; S.A: sem aplicação; (DAP) dias após plantio.

Diferentemente dos arquivos de clima e de solo, os arquivos com os parâmetros das culturas foram iguais para todos os municípios, ou seja, somente diferenciou-se o sistema simulado. As análises de produtividade foram feitas para um ciclo de 457 dias para a palma em condições de consórcio e de 107 dias para o sorgo. Nas condições de cultivo exclusivo, o ciclo foi de 362 dias para o clone sob cobertura morta e 382 sob adubação nitrogenada. Para o clone

sob cobertura morta o sistema foi simulado iniciando o ciclo após corte de uniformização da cultura, sendo a biomassa simulada no modelo representando os cladódios que são colhidos, isto é, de segunda ordem em diante. Frise-se que as análises produtivas dos sistemas consorciados foram feitas considerando o plantio do sorgo aproximadamente quatro meses após o plantio da palma, conforme Jardim et al., (2021).

Tabela 5. Parâmetros utilizados no AquaCrop para simulação da produtividade dos diferentes sistemas produção palma-sorgo

Parâmetros	Sistema de cultivo/ Densidades											
	¹ Sistema I				² Sistema II				³ Sistema III			
	0,10 m × 1,00 m		0,20 m × 1,00 m		0,10 m × 1,25 m		0,20 m × 1,25 m		0,20 m × 1,00 m		0,20 m × 1,50 m	
	Pa	So	Pa	So	Pa	So	Pa	So	Pa	So	Pa	So
Densidade (plantas m ⁻²)	10,0	20,0	5,0	20,0	8,0	16,0	4,0	16,0	5,00	20,0	3,33	16
Cobertura inicial do dossel (%)	5,0	2,70	2,5	3,1	3,36	1,6	1,4	1,92	2,50	8,6	1,8	5,92
Expansão do dossel (% dia ⁻¹)	3,0	8,5	2,5	7,3	2,1	9,2	2,2	8,6	2,0	5,3	1,9	5,4
Máx. desenvolvimento do dossel (%)	74	81	59	87	56	81	43	93	67	99	62	92
Declínio do dossel (% dia ⁻¹)	3	3,9	3	5	3	3	3	3	3	3,1	3	3,1
Emergência (DAP)	0	5	0	5	0	5	0	5	0	5	0	25
Máx. desenvolvimento do dossel (DAP)	185	75	245	85	250	75	270	92	300	105	310	102
Início da senescência (DAP)	457	100	457	100	457	103	457	106	457	107	457	107
Início da floração (DAP)	457	107	457	107	457	107	457	107	457	107	457	107
Profundidade da raiz (m)	0,70	0,45	0,70	0,45	0,70	0,45	0,70	0,45	0,70	0,45	0,70	0,45
Profundidade máxima da raiz (DAP)	160	90	175	80	285	90	300	80	260	70	275	70
Max. Evapotranspiração da cultura (KC)	0,52	1,10	0,52	1,10	0,52	1,10	0,52	1,10	0,52	1,10	0,52	1,10
Efeito da Cobertura do Dossel no final do ciclo (%)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Produtividade da água normalizada (g m ⁻²) -WP	35,9	18,4	27,5	21,5	35,9	22,3	25,4	22,7	20,4	29	23,5	25,4
Índice de colheita - HI (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Função de expansão do dossel												
p-superior	0,45	0,25	0,45	0,25	0,35	0,25	0,35	0,25	0,45	0,25	0,45	0,25
p-inferior	0,75	0,60	0,75	0,55	0,70	0,60	0,70	0,55	0,80	0,60	0,80	0,55
Forma da curva	5,00	3,00	5,00	3,00	6,00	3,00	6,00	3,00	5,00	3,00	5,00	3,00
Função de fechamento estomático												
p-superior	0,75	0,65	0,75	0,65	0,75	0,65	0,75	0,65	0,75	0,65	0,75	0,65
Forma da curva	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00	4,00	3,00
Função de senescência no dossel precoce												
p-superior	0,8	0,65	0,8	0,75	0,8	0,65	0,8	0,75	0,8	0,65	0,8	0,75
Forma da curva	4,50	3,00	4,50	3,00	4,50	3,00	4,50	3,00	4,50	3,00	4,50	3,00
Efeito da fertilidade	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
Temperatura base	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Temperatura superior	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Manejo de ervas daninhas	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom
Cobertura relativa de ervas daninhas/ no final da temporada (%)	16/6 %	16/6 %	14/5 %	14/5 %	13%/5 %	13%/5 %	10%/6 %	11%/6 %	10%/5 %	15%/5 %	9%/4 %	13%/3 %

¹Espaçamentos entre plantas de palma forrageira em consórcio com sorgo sob orientação de cultivo leste-oeste;

²Espaçamentos entre plantas de palma forrageira em consórcio com sorgo sob orientação de cultivo norte-sul;

³Espaçamentos entre linhas de cultivo para palma forrageira em consórcio com sorgo. Pa: Palma; Sor: Sorgo. (DAP) dias após plantio.

2.3.4 Parâmetro de Manejo

No que diz respeito ao arquivo de irrigação para as simulações de condições irrigadas, este foi calculado com base em 80% da ETc da cultura da palma e acumulado em turnos de rega de sete dias ao longo das respectivas durações dos ciclos vegetativos dos sistemas simulados. As simulações em sequeiro consistiram basicamente em retirar o arquivo de irrigação do respectivo compartimento.

2.4 SIMULAÇÃO DE ÉPOCAS DE PLANTIO

Foi simulada a produtividade em biomassa para o início do ciclo dos sistemas de cultivos para o 15º dia de todos os meses do ano, isto é: 15/01, 15/02, 15/03, 15/04, 15/05, 15/06, 15/07, 15/08, 15/09, 15/10, 15/11, 15/12, para todos os locais estudados.

3. RESULTADOS

3.1 SIMULAÇÃO DA ÉPOCA DE PLANTIO/CORTE DA PALMA FORRAGEIRA PARA MUNICÍPIOS INSERIDOS NO SEMIÁRIDO

3.1.1 Serra Talhada-PE

Na Figura 3 verifica-se as simulações das produtividades para os arranjos dos sistemas de produção de forragem envolvendo o clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio. Constatou-se para esse município que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 2, espaçamento $0,10 \times 1,25$ m na condição irrigada (Figura 3b). Nesse sistema a maior produtividade simulada (Ys) foi para o plantio da palma no mês de novembro, cuja biomassa simulada para o sistema foi de $53,53 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 71,05% referente à produtividade da palma. A Ys no sistema 1, condição irrigada, arranjo $0,10 \times 1,00$ m foi de $50,06 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 79,15% referente à Ys do clone OEM. Além disso, a Ys nesse arranjo superou em 21,76% a do arranjo $0,20 \times 1,00$ m na condição irrigada. No sistema 3, o arranjo $1,50 \times 0,20$ m sob irrigação foi o mais produtivo, com Ys de $38,89 \text{ ton ha}^{-1}$ (46,08 % referente ao clone OEM), para o plantio em janeiro, sendo 16,57 % superior a Ys do arranjo $1,50 \times 0,20$ m. Quando se analisa nas condições de sequeiro, verificou-se que foi o arranjo $0,10 \times 1,00$ m que apresentou maior valor de Ys, ou seja, $13,14 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo deste valor 60,61% referente à produtividade do clone OEM, com

plantio simulado para o mês de fevereiro. Ademais, esse arranjo em condição de queiro apresentou Ys superior em 14,68 e 65,56% em comparação com os arranjos $1,00 \times 0,20$ m (sistema 3) e $0,10 \times 1,25$ m (sistema 2), respectivamente.

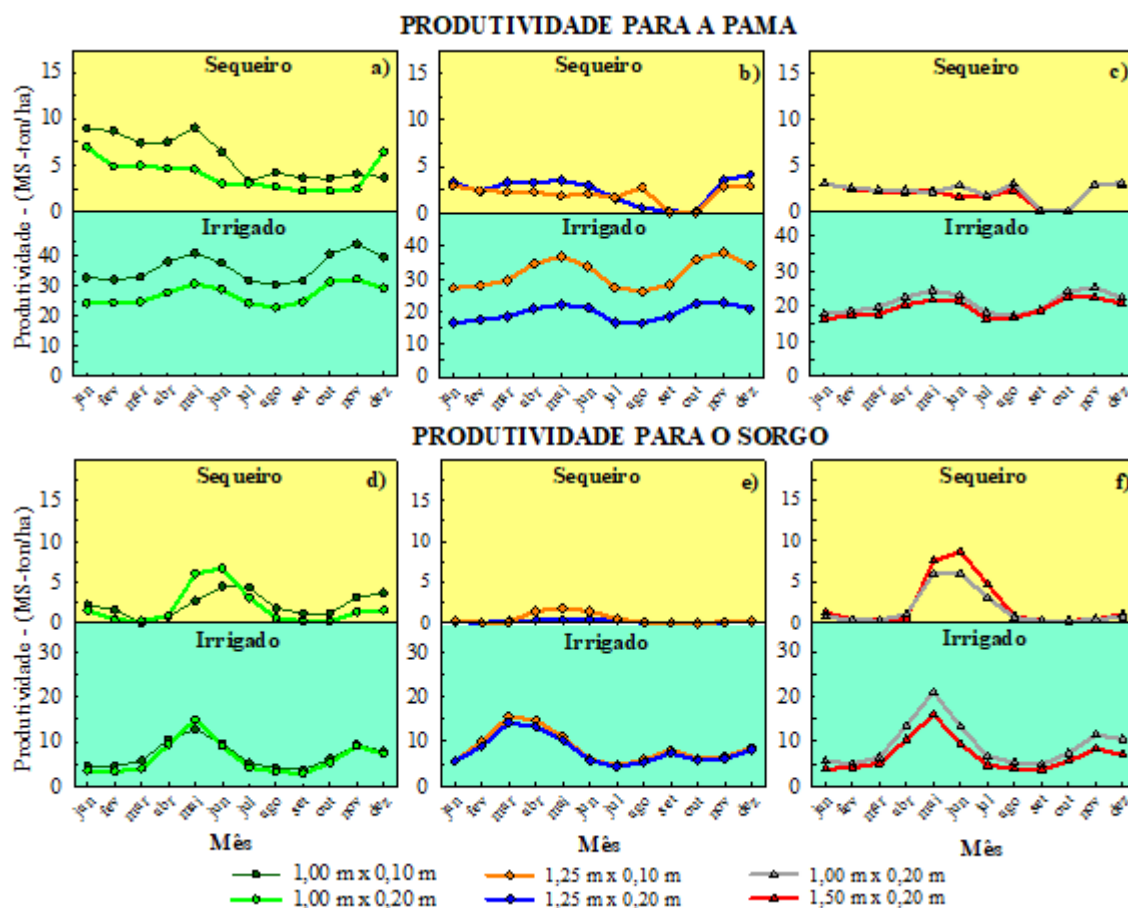


Figura 3. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Serra Talhada-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Na Figura 4 encontram-se as simulações das produtividades para Serra Talhada-PE para os arranjos do clone OEM cultivado de forma exclusiva. Constatou-se os maiores valores de biomassa simulada (Ys) para a palma sob cobertura morta e irrigada (Figura 4a) com corte no mês de novembro, apresentando Ys entre $31,49 \text{ ton ha}^{-1}$. Ainda, o maior valor de Ys para esse tratamento na condição de sequeiro foi $14,26 \text{ ton ha}^{-1}$ com corte no mês de janeiro. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas sob irrigação, as melhores produtividades simuladas foram obtidas para a simulação de corte no mês de novembro, com produtividade de $12,95 \text{ ton ha}^{-1}$. Quando se analisa as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 4b), verifica-se para os dois níveis de adubação (50 e 150 kg ha^{-1}) a maior produtividade para a condição irrigada com o plantio em novembro, com Ys de $27,14$ e $34,76 \text{ ton ha}^{-1}$,

respectivamente. Por outro lado, na condição de sequeiro os valores foram 5,26 e 6,39 ton ha⁻¹, com plantio em janeiro e em maio, respectivamente, para os níveis 50 e 150 kg ha⁻¹.

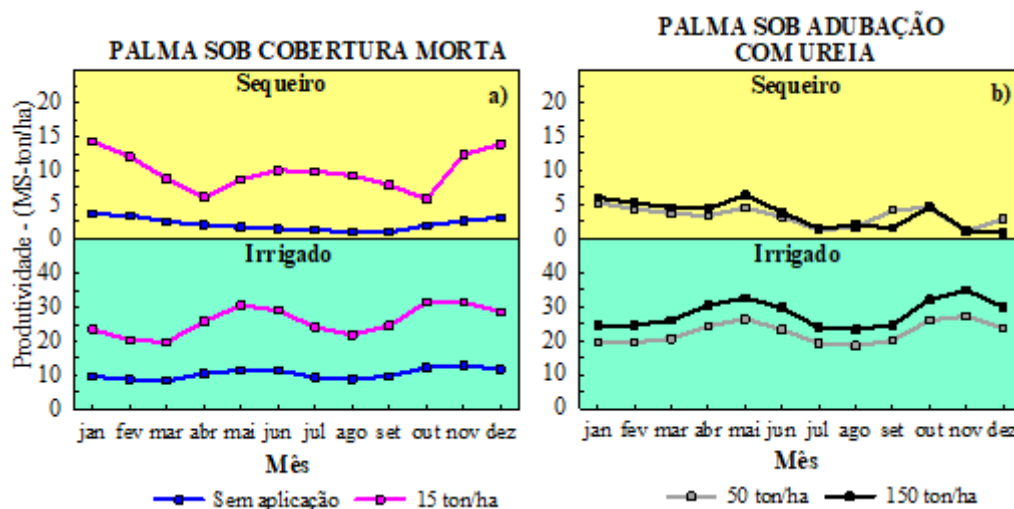


Figura 4. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Serra Talhada-PE.

3.1.2 Arcoverde-PE

Na Figura 5 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Arcoverde para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio. Verificou-se que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 2, especificamente no espaçamento 0,10 × 1,25 m na condição irrigada. Nesse sistema a maior produtividade simulada (Ys) foi para o plantio da palma no mês de março, cuja biomassa simulada para o sistema foi de 48,80 ton ha⁻¹, sendo 53,51% referente a produtividade da palma. A Ys no sistema 1, arranjo 0,10 × 1,00 m foi de 46,15 ton ha⁻¹. Em que pese tal valor não tenha sido muito distante da Ys do arranjo 0,10 × 1,25 m, verificou-se aqui melhor favorecimento da cultura da palma em detrimento do sorgo, visto que deste valor 89,15% refere-se a Ys do clone OEM. Ademais, a Ys nesse arranjo foi superior em 27,77% que a do arranjo 1,00 × 0,20 m. No sistema 3, o arranjo mais produtivo para o município foi o de 1,00 m × 0,20, com 32,28 ton ha⁻¹ (56,2% referente à biomassa do clone OEM). Quando se analisa nas condições de sequeiro, verificou-se que o arranjo 0,10 × 1,00 m foi o que apresentou maior Ys, com valor de 5,51 ton ha⁻¹, sendo deste valor aproximadamente 92% referente a produtividade do clone OEM, com plantio simulado para o mês de outubro.

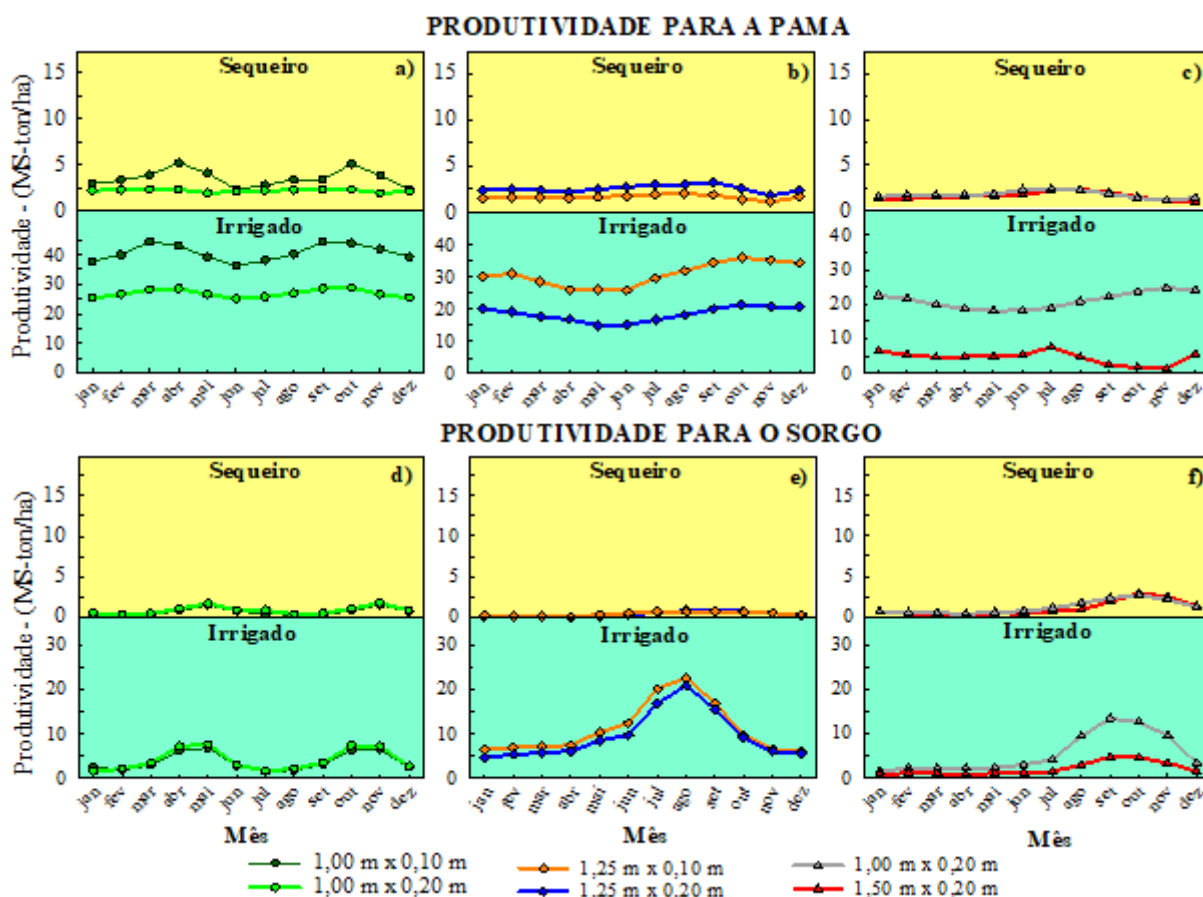


Figura 5. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Arcoverde-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Ao se analisar para o município de Arcoverde-PE as produtividades simuladas de acordo com a época de corte ou de plantio, constatou-se para o corte da palma no mês de dezembro uma produtividade em biomassa simulada (Y_s) de $31,17 \text{ ton ha}^{-1}$ na simulação com aplicação de cobertura morta sob irrigação (Figura 6a). Para a simulação na condição de sequeiro, mas com aplicação de cobertura morta, os maiores valores de Y_s foram para os meses de junho e julho, isto é $8,92$ e $8,42 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas sob irrigação, as melhores produtividades simuladas foram obtidas para os meses de novembro, dezembro e janeiro ($14,04$; $14,87$ e $14,57 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente). Quando se analisa as simulações para épocas de o plantio do clone OEM sob adubação (Figura 6b), verifica-se que a maior produtividade para a condição irrigada é obtida com o plantio em outubro em que a Y_s dos tratamentos 50 e 150 kg há^{-1} foram de $26,89$ e $35,52 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, na condição de sequeiro os valores foram, respectivamente, $3,15$ e $3,91 \text{ ton ha}^{-1}$.

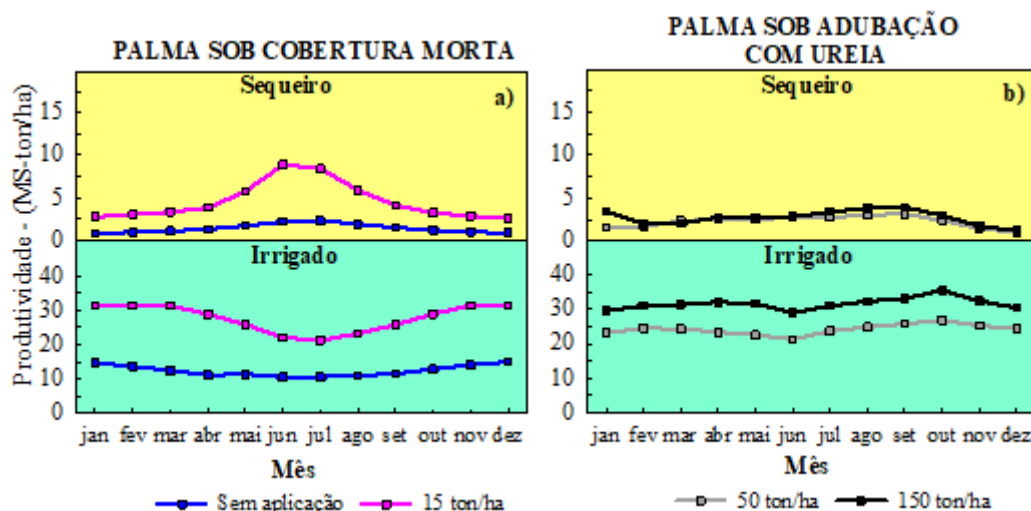


Figura 6. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Arcoverde-PE.

3.1.3 Petrolina-PE

Na Figura 7 encontram-se as simulações das produtividades para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio para Petrolina-PE. Obteve-se que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 2, mais especificamente no espaçamento $0,10 \times 1,25$ m na condição irrigada. Nesse sistema a maior produtividade simulada (Y_s) foi para o plantio da palma no mês de novembro, cuja biomassa simulada para o sistema foi de $56,84 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo deste valor 67,49 % referente a biomassa do clone OEM. A Y_s no sistema 1, arranjo $0,10 \times 1,00$ m foi de $42,10 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 90,34% referente à Y_s do clone OEM. Além disso, a Y_s nesse arranjo superou em 20,18% a do arranjo $0,20 \times 1,00$ m. Quando se analisou nas condições de sequeiro, verificou-se que o arranjo $0,10 \times 1,00$ m foi o que apresentou maior valor de Y_s , $33,26 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo deste valor 69,92% referente à produtividade do clone OEM, com plantio simulado para o mês de maio.

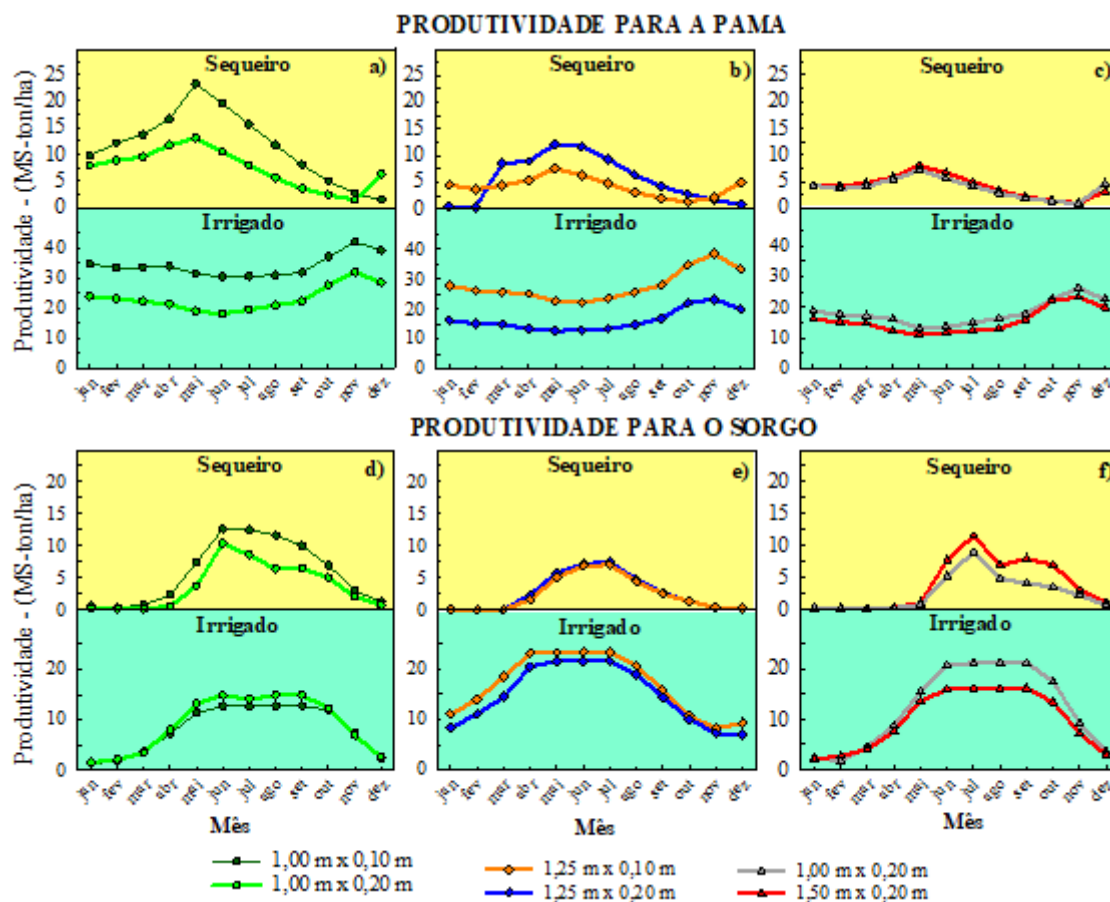


Figura 7. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Petrolina-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Ao se analisar para o município de Petrolina-PE, constatou-se para o corte da palma no mês de novembro Ys de 31,07 ton ha⁻¹ na simulação com aplicação de cobertura morta sob irrigação (Figura 7a). A Ys para esse tratamento na condição de sequeiro foi de 20,69 ton ha⁻¹ com corte no mês de fevereiro. Para a simulação na condição de sequeiro e sem aplicação de cobertura morta os maiores valores de Ys foram para os meses de junho e julho (8,92 e 8,42 ton ha⁻¹, respectivamente). Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas sob irrigação, as melhores produtividades simuladas foram obtidas para os meses de novembro, e dezembro (12,77 e 11,93 ton ha⁻¹, respectivamente). Quando se analisa as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 7b), verifica-se que a maior produtividade para a condição irrigada é obtida com o plantio em novembro, apresentando Ys de 26,50 e 33,84 ton ha⁻¹, respectivamente, para os tratamentos 50 e 150 kg ha⁻¹. Além disso, quando se compara as produtividades do melhor mês de plantio, ou seja, novembro, com o mês menos recomendado, isto é, julho, verifica-se, para aquele, produtividade de até 30 e 25%, respectivamente, para os

tratamentos 50 e 150 kg ha⁻¹. Por sua vez, na condição de sequeiro os melhores valores foram, respectivamente, 14,76 e 20,85 ton ha⁻¹, com plantio em maio.

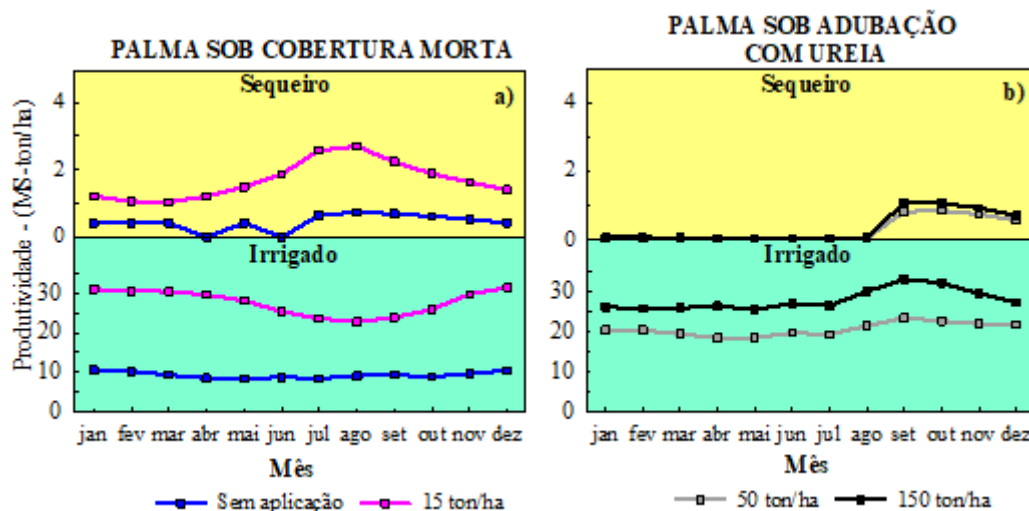


Figura 8. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Petrolina-PE.

3.1.4 Monteiro-PB

Na Figura 9 constata-se as simulações das produtividades para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio para Monteiro-PB. Obteve-se que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 2 (arranjo e 0,10 × 1,25 m) na condição irrigada. Para este, o melhor mês de plantio foi março, com uma Ys de 47,63 ton ha⁻¹ (sendo 58,43% referente à biomassa do clone OEM). Nesse sistema, o arranjo 0,20 × 1,25 apresentou Ys máxima de 37,40 ton ha⁻¹, o que representa aproximadamente 21,5 % inferior quando se compara com o arranjo mais adensado (0,10 × 1,25 m). O maior valor de biomassa simulada no sistema 1 foi para o arranjo 0,10 × 1,00 m com plantio em março e Ys de 46,95 ton ha⁻¹, sendo 93,06% referente à Ys do clone OEM. Além disso, a Ys nesse arranjo foi superior em 32,06% a do arranjo 0,20 × 1,00 m. No sistema 3, o arranjo mais produtivo para o município foi o arranjo 1,00 m × 0,20, com 30,79 ton ha⁻¹ (57,99% referente à biomassa do clone OEM), com plantio do clone em junho. Quando se analisou nas condições de sequeiro, verificou-se que o arranjo 0,10 × 1,00 m foi o que apresentou maior valor de Ys (14,31 ton ha⁻¹) sendo deste valor 77,01% referente à produtividade do clone OEM, com plantio simulado para o mês de agosto.

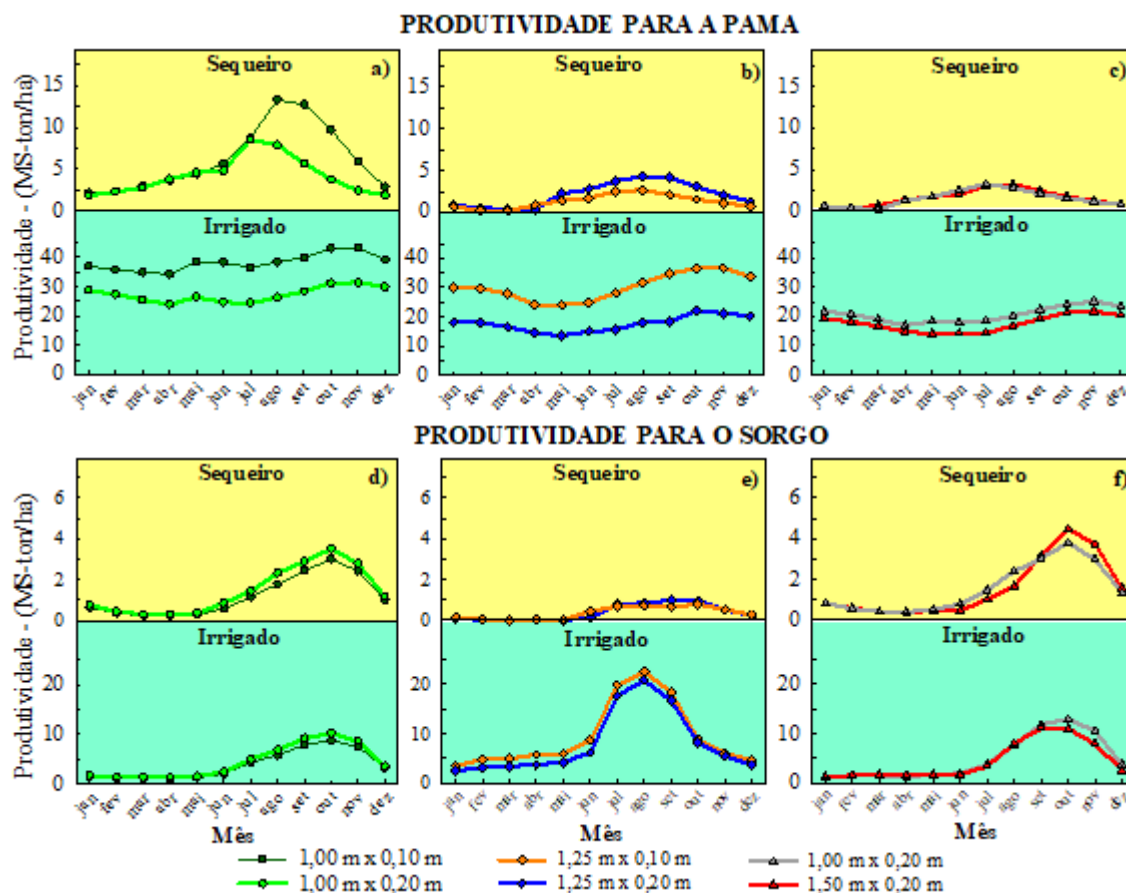


Figura 9. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Monteiro-PB. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Ao se analisar o município de Monteiro-PE (Figura 10a), constatou-se os maiores valores de biomassa simulada (Y_s) para a palma sob cobertura morta e irrigada com corte nos meses de novembro a março, apresentando Y_s entre 31,48 e 32,49 ton ha^{-1} , com valores menores de Y_s no período de abril a setembro. Ainda, o maior valor de Y_s para esse tratamento na condição de sequeiro foi 17,60 ton ha^{-1} com corte no mês de abril. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas sob irrigação, as melhores produtividades simuladas também foram obtidas para a simulação de corte nos meses de novembro a março, com produtividade variando entre 12,38 e 12,757 ton ha^{-1} para esse período. Quando se analisou as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 10b), verificou-se para os dois níveis de adubação (50 e 150 kg ha^{-1}) a maior produtividade para a condição irrigada com o plantio em outubro, com Y_s de 27,49 e 35,72 ton ha^{-1} , respectivamente. Por outro lado, na condição de sequeiro os valores foram, respectivamente, 5,71 e 9,04 ton ha^{-1} .

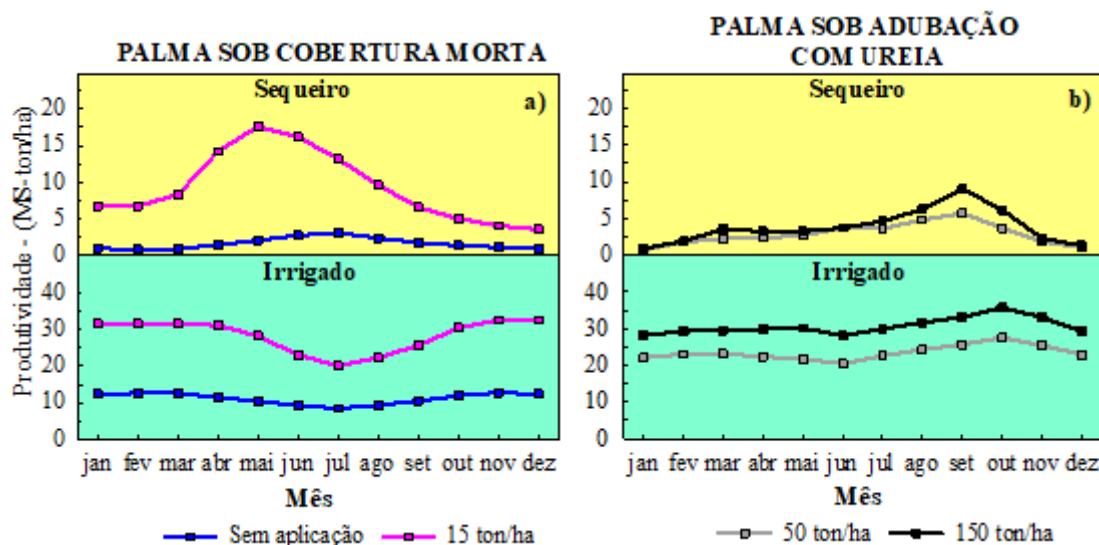


Figura 10. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Monteiro-PB.

3.1.5 Surubim-PE

Na Figura 11 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Surubim-PE para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio. Verificou-se para esse município que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 1, espaçamento $0,10 \times 1,00$ m na condição irrigada. Nesse sistema a maior produtividade simulada (Y_s) foi para o plantio da palma no mês de outubro, cuja biomassa simulada para o sistema foi de $42,05 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 96,20% referente à produtividade da palma. A Y_s no sistema 2, condição irrigada, arranjo $0,10 \times 1,25$ m foi de $38,76 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 59,40% referente à Y_s do clone OEM, com plantio em março. Além disso, a Y_s nesse arranjo superou em 26,43% a do arranjo $0,20 \times 1,25$ m na condição irrigada. No sistema 3, o arranjo $1,00 \times 0,20$ m sob irrigação foi o mais produtivo, com Y_s de $25,37 \text{ ton ha}^{-1}$, para o plantio em junho, sendo 17,21 % superior a Y_s do arranjo $1,50 \times 0,20$ m. Quando se analisou nas condições de sequeiro, verificou-se que também foi o arranjo $0,10 \times 1,00$ m que apresentou maior valor de Y_s , $2,11 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo deste valor 96,40% referente à produtividade do clone OEM, com plantio simulado para o mês de setembro.

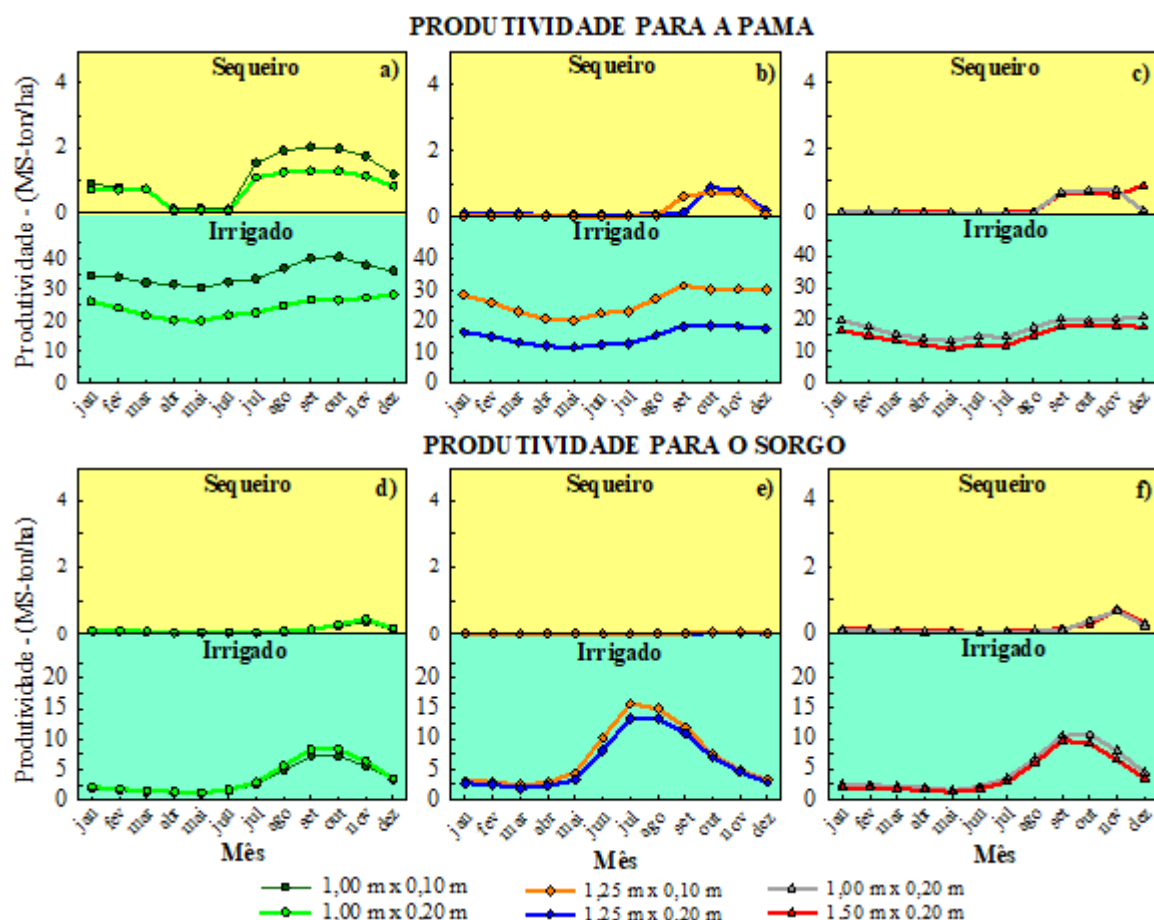


Figura 11. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Surubim-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Na Figura 12 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Surubim-PE para os arranjos do clone OEM cultivado de forma exclusiva. Constatou-se os maiores valores de biomassa simulada (Y_s) para a palma sob cobertura morta e irrigada (Figura 12a) com corte nos meses de dezembro e janeiro, apresentando Y_s entre 31,39 e 30,97 ton ha^{-1} , respectivamente, com valores menores de Y_s no período de junho a setembro. Ainda, o maior valor de Y_s para esse tratamento na condição de sequeiro foi 2,70 ton ha^{-1} com corte no mês de agosto. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas sob irrigação, as melhores produtividades simuladas também foram obtidas para o corte nos meses de dezembro e janeiro, com produtividade de 10,58 e 10,48 ton ha^{-1} , respectivamente. Quando se analisou as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 12b), verificou-se para os dois níveis de adubação (50 e 150 kg ha^{-1}) a maior produtividade para a condição irrigada com o plantio em outubro, com Y_s de 23,54 e 33,32 ton ha^{-1} , respectivamente. Por outro lado, na condição de sequeiro os valores foram, respectivamente, 0,85 e 1,09 ton ha^{-1} .

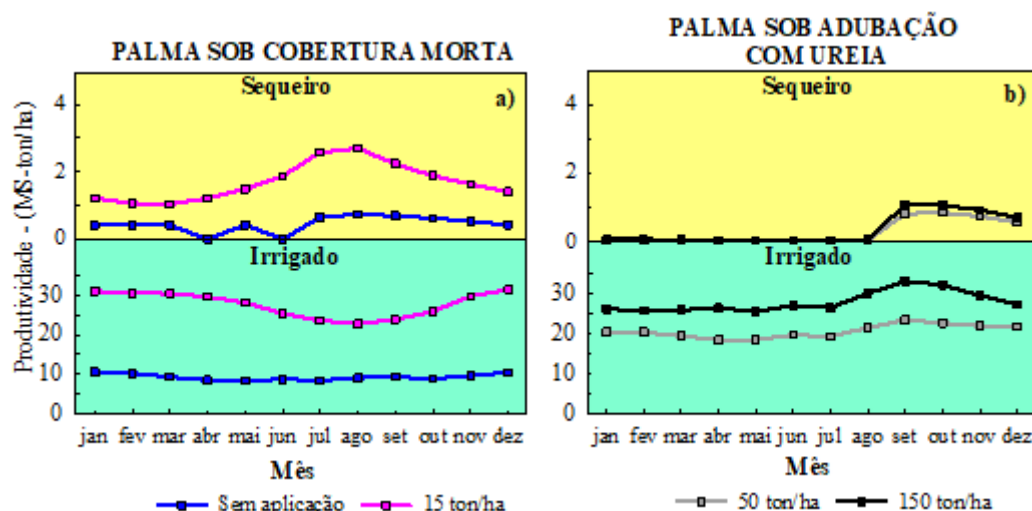


Figura 12. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Surubim-PE.

3.1.6 Garanhuns-PE

Na Figura 13 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Garanhuns-PE para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio. Verificou-se para esse município que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 1, espaçamento $0,10 \times 1,00$ m na condição irrigada. Nesse sistema a maior produtividade simulada (Y_s) foi para o plantio da palma no mês de agosto, cuja biomassa simulada para o sistema foi de $19,35 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 85,42 % referente à produtividade da palma. A Y_s no sistema 2, condição irrigada, arranjo $0,10 \times 1,25$ m foi de $17,29 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 59,13% referente à Y_s do clone OEM. Além disso, a Y_s nesse arranjo superou em 16,60% a do arranjo $0,20 \times 1,25$ m na condição irrigada. No sistema 3, o arranjo $1,50 \times 0,20$ m sob irrigação foi o mais produtivo, com Y_s de $16,07 \text{ ton ha}^{-1}$ (51,84 % referente ao clone OEM), para o plantio em junho, sendo 1,66 % superior a Y_s do arranjo $1,50 \times 0,20$ m. Quando se analisou nas condições de sequeiro, verificou-se que também foi o arranjo $0,10 \times 1,00$ m que apresentou maior valor de Y_s , $6,53 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo deste valor 90,79% referente à produtividade do clone OEM, com plantio simulado para o mês de setembro. Ademais, esse arranjo apresentou Y_s superior em 71,05 e 58,88 % em comparação com os arranjos $1,00 \times 0,20$ m (sistema 3) e $0,10 \times 1,25$ m (sistema 2), nessa sequência.

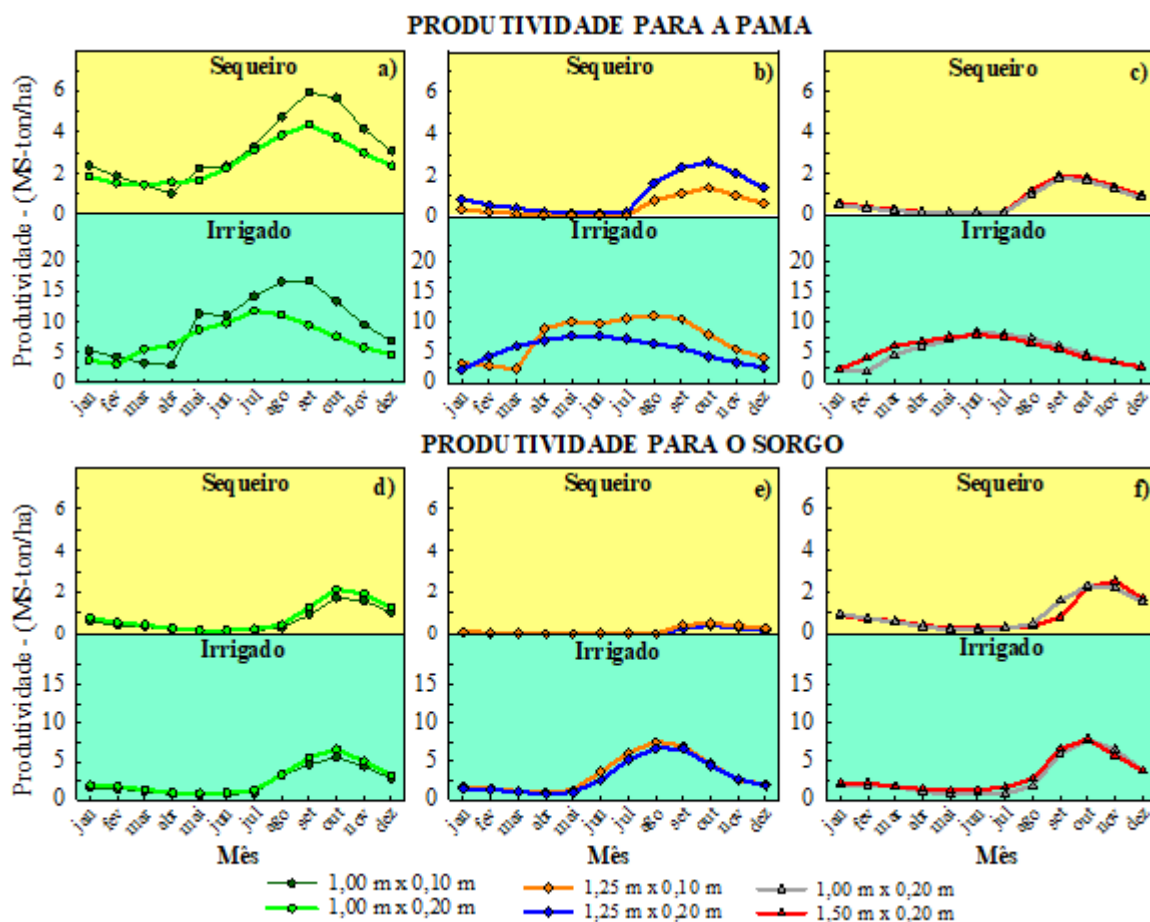


Figura 13. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Garanhuns-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Na Figura 14 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Garanhuns-PE para os arranjos do clone OEM cultivado de forma exclusiva. Constatou-se os maiores valores de biomassa simulada (Y_s) para a palma sob cobertura morta e irrigada (Figura 14a) com corte nos meses de maio e junho, apresentando Y_s de 18,63 e 17,707 ton ha^{-1} , respectivamente, com valores menores de Y_s no período de outubro a fevereiro. Ainda, o maior valor de Y_s para esse tratamento na condição de sequeiro foi 7,01 ton ha^{-1} com corte no mês de julho. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas na condição irrigada, as melhores produtividades simuladas foram obtidas para a simulação de corte nos meses de maio e junho, com produtividade de 5,96 e 6,40 ton ha^{-1} , respectivamente. Quando se analisa as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 14b), verifica-se para os dois níveis de adubação (50 e 150 kg ha^{-1}) a maior produtividade para a condição irrigada com o plantio em agosto, com Y_s de 12,30 e 16,46 ton ha^{-1} , respectivamente.

Por outro lado, na condição de sequeiro os valores foram, respectivamente, 2,70 e 3,52 ton ha⁻¹.

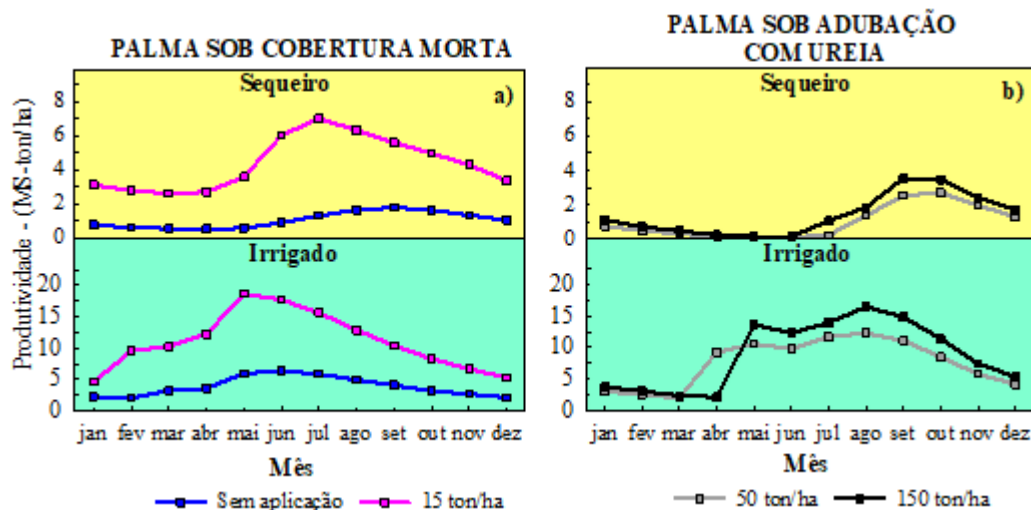


Figura 14. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Garanhuns-PE.

3.1.7 Petrolândia-PE

Na Figura 15 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Petrolândia-PE para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio. Verificou-se para esse município que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 2, espaçamento $0,10 \times 1,25$ m na condição irrigada. Nesse sistema a maior produtividade simulada (Y_s) foi para o plantio da palma no mês de novembro (Figura 15b), cuja biomassa simulada para o sistema foi de $46,13 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 70,26 % referente à produtividade da palma e superior em 36,21 % o espaçamento $0,20 \times 1,25$ m. A Y_s no sistema 1, condição irrigada, arranjo $0,10 \times 1,00$ m foi de $41,82 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 71,58% referente à Y_s do clone OEM, com plantio em abril e em maio. Além disso, a Y_s nesse arranjo superou em 9,73% a Y_s do arranjo $0,20 \times 1,00$ m na condição irrigada. No sistema 3, o arranjo $1,50 \times 0,20$ m sob irrigação foi o mais produtivo, com Y_s de $33,13 \text{ ton ha}^{-1}$ (40,18 % referente à biomassa da palma), para o plantio em maio, sendo 6,61 % superior a Y_s do arranjo $1,50 \times 0,20$ m. Quando se analisou nas condições de sequeiro, verificou-se que foi o arranjo $0,10 \times 1,00$ m (Sistema 1) que apresentou maior valor de Y_s , $4,00 \text{ ton ha}^{-1}$ (91,35 % referente à biomassa do sorgo) com plantio simulado para o mês de fevereiro.

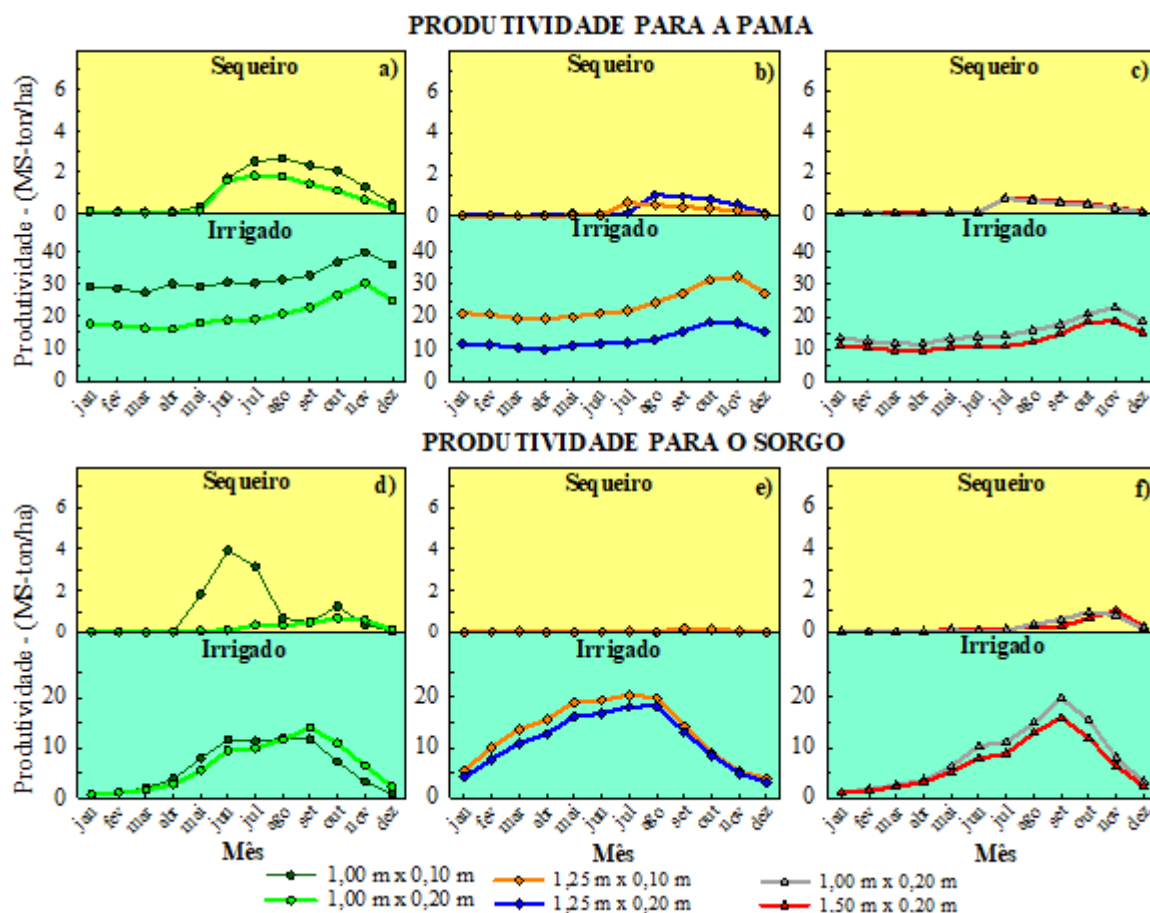


Figura 15. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Petrolândia-PE. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Na Figura 16 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas do município de Petrolândia-PE para os arranjos do clone OEM cultivado de forma exclusiva. Constatou-se os maiores valores de biomassa simulada (Y_s) para a palma sob cobertura morta e irrigada (Figura 16a) com corte no mês de novembro, apresentando Y_s de $31,44 \text{ ton ha}^{-1}$. Ainda, o maior valor de Y_s para esse tratamento na condição de sequeiro foi $4,73 \text{ ton ha}^{-1}$ com corte no mês de junho. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas na condição irrigada, a maior produtividade simulada foi obtida para o corte no mês novembro, com produtividade de $10,50 \text{ ton ha}^{-1}$. Quando se analisou as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 16b), verificou-se para os dois níveis de adubação (50 e 150 kg ha^{-1}) a maior produtividade para a condição irrigada com o plantio em agosto, com Y_s de $23,99$ e $30,22 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, na condição de sequeiro os valores simulados ao longo do ano foram inferiores a $1,40 \text{ ton ha}^{-1}$ para ambos os níveis de adubação.

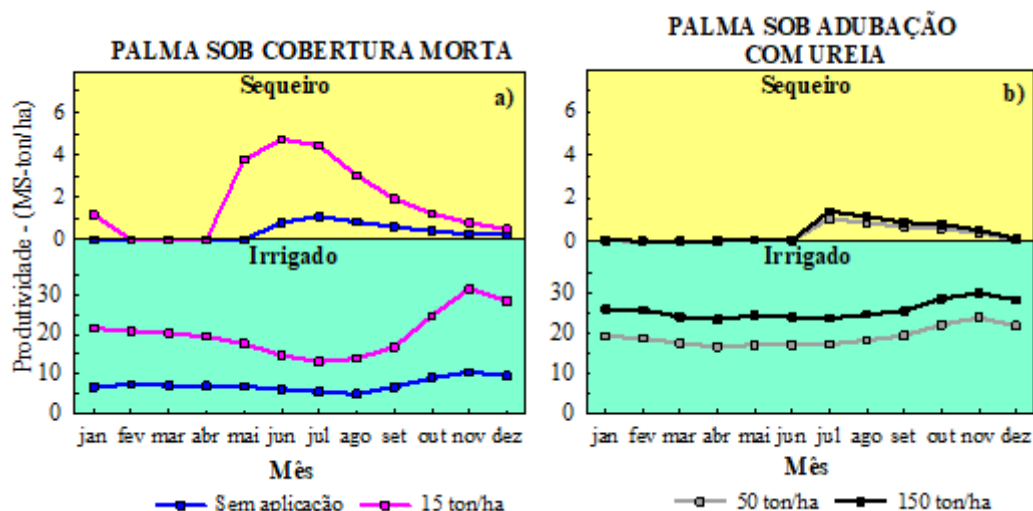


Figura 16. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação para o município de Petrolândia-PE.

3.1.8 Paulistana-PI

Na Figura 17 encontram-se as simulações das produtividades para as condições edafoclimáticas de Paulistana-PI para os arranjos do clone OEM em consórcio com o sorgo em função das épocas de plantio. Verificou-se para esse município que o sistema simulado mais produtivo foi o sistema 2, espaçamento $0,10 \times 1,25$ m na condição irrigada. Nesse sistema a maior produtividade simulada (Y_s) foi para o plantio da palma no mês de dezembro (Figura 17b), cuja biomassa simulada para o sistema foi de $51,76 \text{ ton ha}^{-1}$ (60,94% referente à produtividade da palma), de modo que superou em 10,58% a Y_s para o espaçamento $0,20 \times 1,25$ m. A Y_s no sistema 1, condição irrigada, arranjo $0,10 \times 1,00$ m foi de $50,65 \text{ ton ha}^{-1}$, sendo 87,06% referente à Y_s do clone OEM, com plantio em janeiro. Além disso, a Y_s nesse arranjo superou em 8,02% a Y_s do arranjo $0,20 \times 1,00$ m na condição irrigada. No sistema 3, o arranjo $1,50 \times 0,20$ m sob irrigação foi o mais produtivo, com Y_s de $41,33 \text{ ton ha}^{-1}$ (50,34% referente à biomassa da palma), para o plantio em fevereiro, sendo 8,41% superior a Y_s do arranjo $1,50 \times 0,20$ m. Quando se analisou nas condições de sequeiro, verificou-se que foi o arranjo $0,10 \times 1,00$ m (Sistema 1) foi que apresentou maior valor de Y_s , $16,58 \text{ ton ha}^{-1}$ (72,12% referente à biomassa do sorgo) com plantio simulado para o clone OEM para o mês de março.

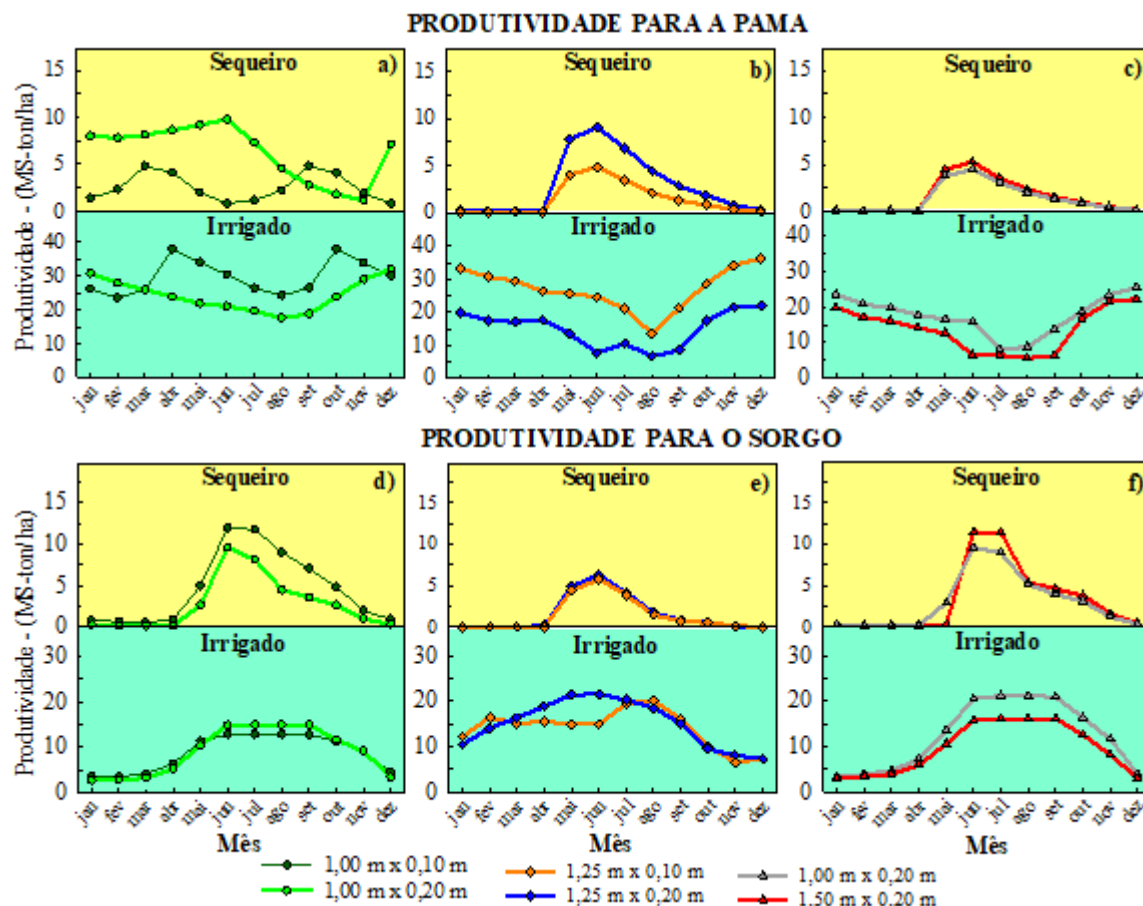


Figura 17. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte da palma para o consórcio palma-sorgo sob diferentes arranjos de espaçamento de cultivo para o município de Paulistana-PI. Ciclo palma 457 dias. Ciclo sorgo 107 dias.

Ao se analisar para o município de Paulistana-PI, constatou-se para o corte da palma no mês de dezembro Ys de $31,50 \text{ ton ha}^{-1}$ na simulação com aplicação de cobertura morta sob irrigação (Figura 18a). A Ys para esse tratamento na condição de sequeiro foi de $18,21 \text{ ton ha}^{-1}$ com corte no mês de março. Para a simulação na condição de sequeiro e sem aplicação de cobertura morta os maiores valores de Ys foi para o mês de maio, com $3,67 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente. Por sua vez, sem aplicação de cobertura morta, mas sob irrigação, as melhores produtividades simuladas foram obtidas para os meses de dezembro e janeiro ($12,08$ e $11,95 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente). Quando se analisou as simulações para épocas de plantio do clone OEM sob adubação (Figura 18b), verificou-se que a maior produtividade para a condição irrigada é obtida com o plantio em dezembro para o nível 50 kg e em fevereiro para o nível 150 kg ha^{-1} , apresentando Ys de $25,86$ e $34,02 \text{ ton ha}^{-1}$, respectivamente. Na condição de sequeiro verifica-se o mês de junho como recomendado para o plantio do clone, visto que possibilita uma Ys de $14,16 \text{ ton ha}^{-1}$ para o nível 150 kg ha^{-1} , superando em $31,34\%$ a Ys para o mesmo mês no nível 50 kg ha^{-1} .

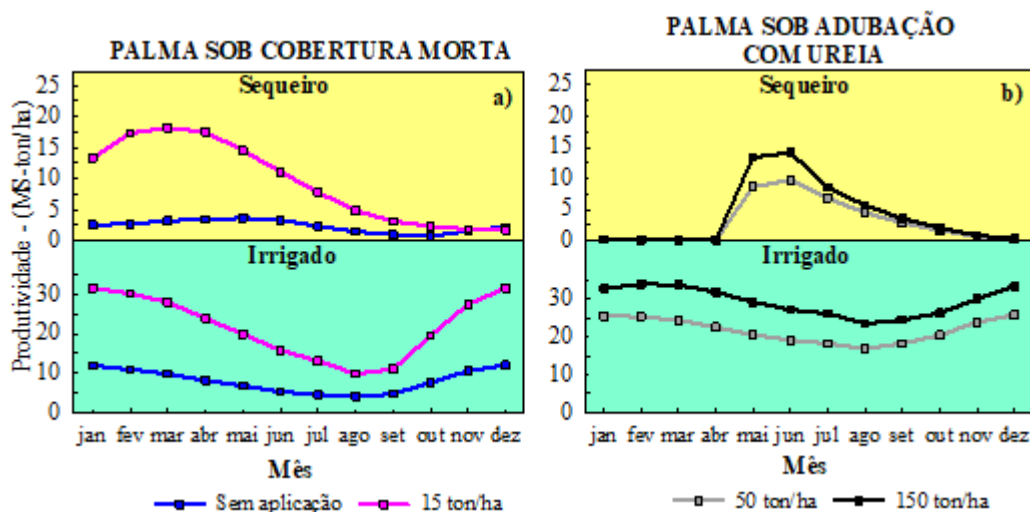


Figura 18. Produtividades simuladas de acordo com a época de corte/plantio da palma OEM sob aplicação de cobertura morta e sob adubação nitrogenada para o município de Paulistana-PI.

4. DISCUSSÃO

O consórcio entre a palma e o sorgo se mostra como uma alternativa para a produção de forragem nas condições semiáridas do Brasil. Corroborando com Diniz et al., (2017), o consórcio entre essas duas espécies apresenta aumento considerável em seus rendimentos em comparação aos seus respectivos sistemas exclusivos. Percebeu-se aqui que a irrigação proporcionou ganhos superiores a 100% para simulação nos sistemas consorciados em comparação aos respectivos sistemas na condição de sequeiro. Conforme relatado por Silva et al., (2023) o uso da irrigação num consórcio palma-sorgo melhora o desempenho produtivo quando irrigado com pelo menos 50% ET₀. Nesse sentido, suprir a necessidade hídrica, ainda que de espécies tolerantes ao déficit hídrico como a palma forrageira e o sorgo, por meio da irrigação, se apresenta como uma excelente estratégia para ganhos de rendimento e maiores lucratividades sobre o sistema.

Ressalte-se que a consorciação entre a palma forrageira e o sorgo em ambientes semiáridos eleva a eficiência no uso dos recursos naturais por meio da complementaridade interespecífica das culturas (Diniz et al., 2017; Jardim et al., 2021). Não obstante, escolher as melhores arranjos e densidades de plantio é primordial para a obtenção dos benefícios que se espera desse tipo de sistema.

Obteve-se que os arranjos mais adensados foram os mais produtivos em biomassa dentro dos respectivos sistemas. Em que pese o arranjo mais adensado (0,10 x 1,00 m) tenha

apresentado maior biomassa simulada para alguns dos pontos simulados, como Surubim-PE e Garanhuns-PE, o arranjo 0,10 x 1,25 m foi o mais recomendado para a maioria dos municípios estudados. Cabe frisar que a densidade de plantio desempenha papel fundamental na competição entre as culturas. Assim, sistemas muito adensados, se mal planejados, facilita uma maior competição entre as culturas, de modo a reduzir significativamente as taxas de crescimento e consequentemente afetar o rendimento de ambas as espécies devido a ineficiência na utilização dos recursos disponíveis, tais como água, nutrientes e radiação solar (Gao et al., 2021; Jardim et al., 2021; Alves et al., 2022).

Percebeu-se com as simulações que conforme maior o adensamento aumenta-se a representatividade da produtividade da palma no sistema, ou seja, em condições mais adensadas, a palma tende a se sobressair em detrimento do sorgo. Isso pode ser explicado pelo fato de a cultura da palma ser plantada aproximadamente quatro meses antes da semeadura do sorgo, assim, quando da ocasião da semeadura do sorgo, a cactácea já se encontra com seu sistema radicular em pleno desenvolvimento e com a emissão de cladódios, acarretando em melhor aproveitamento dos recursos como água, luz e nutrientes. Ressalte-se que um plantio na época errada pode afetar os parâmetros de rendimentos, principalmente devido as condições desfavoráveis de temperatura (prejudicando o acúmulo de graus dias), radiação solar e precipitação pluviométrica (Hadebe et al., 2017; Lu et al., 2017).

Percebeu-se que em condições irrigadas os maiores valores de produtividade simulada foram para o plantio em novembro para a maioria dos municípios. Uma justificativa para isso se dá devido a ser nessa época do ano que, em regra, se inicia o período chuvoso na região. Todavia, alguns locais, como Arcoverde, Garanhuns e Surubim, apesar de estarem inseridos na delimitação do semiárido, possuem significativas diferenças nas suas condições climáticas, tais como menor irregularidade da distribuição anual da precipitação e menores valores médios de temperaturas máxima e mínima ao longo do ano (Silva et al., 2018). Assim, entender a melhor época do ano para o plantio ou implementação de um sistema de produção de forragem é uma das principais estratégias de planejamento, de modo a otimizar os recursos ambientais.

Nesse aspecto, Kumar et al., (2021) obtiveram ganhos de peso de cladódios de até 56,24% para o cacto *Opuntia ficus-indica*, conduzido em uma Região Semiárida da Índia, quando plantado no mês de julho, em comparação com abril. Outros estudos também verificaram a relação do ganho de produtividade com a melhor de disponibilidade e distribuição de água e melhor acúmulo de graus dias proporcionado pela época do ano em culturas como o sorgo (Hadebe et al., 2017) e milho (Mugiyo et al., 2021).

Sob aplicação de cobertura morta foi possível constatar com as simulações que os melhores meses de corte da palma visando uma maior produtividade abrangem junho a setembro. Isso pode ser justificado pelo fato de que esses meses geralmente são os mais frios do ano no local, conseqüentemente, proporciona menos estresse ao material vegetativo plantado. Além disso, temperaturas mais amenas beneficiam o pós-corte da palma, visto que há um estresse causado pela retirada dos cladódios, assim, as condições meteorológicas mais amenas nessa época do ano favorecem a cicatrização das aberturas deixadas pelos cladódios colhidos, bem como favorecem a rápida recuperação, a emissão dos novos cladódios e o crescimento da cultura (Barbosa et al., 2018).

5. CONCLUSÃO

De um modo geral, ao se considerar os resultados das simulações realizadas, para a maioria dos sistemas a melhor época de plantio se confunde com início do período chuvoso, exceto para municípios como Garanhuns-PE, Arcoverde-PE e Surubim-PE, que são locais que apresentam menor irregularidade na distribuição anual das chuvas em comparação com os demais municípios estudados. Em síntese, o plantio no mês de novembro se mostrou a melhor época de plantio/implementação dos sistemas sob condições irrigadas.

Os arranjos mais adensados sob irrigação foram os mais produtivos, especificamente o arranjo $0,10 \times 1,25$ se mostrou o mais recomendado para a maioria dos municípios.

Sob condição de sequeiro, o uso de cobertura morta no solo tende a proporcionar bons níveis de produtividade para a maioria dos municípios, com uma janela de plantio de palma de até três meses (março a maio).

Em que pese haja muito a progredir com os estudos de modelagem, em especial voltado para a palma forrageira, o AquaCrop se mostrou aplicável a essa cultura, de modo a servir como uma ferramenta de tomada de decisão e de avaliação de estratégias de condução da palma forrageira irrigada, de modo a otimizar a exploração da cultura no Semiárido do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akumaga, U., Tarhule, A., e 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>
- Allen, R. G. (2006). FAO Irrigation and Drainage Paper Crop by. 56.

- Alves, C. P., Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., Souza, L. S. B. de, Araújo, G. G. L. de, Souza, C. A. A. de, Salvador, K. R. da S., Leite, R. M. C., Pinheiro, A. G., e Silva, T. G. F. da. (2022). How to enhance the agronomic performance of cactus-sorghum intercropped system: planting configurations, density and orientation. *Industrial Crops and Products*, 184(May). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115059>
- Andrade, A. S., Santos, P. M., Pezzopane, J. R. M., de Araujo, L. C., Pedreira, B. C., Pedreira, C. G. S., Marin, F. R., e Lara, M. A. S. (2016). Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: An overview of model development and application. *Grass and Forage Science*, 71(1), 54–65. <https://doi.org/10.1111/gfs.12177>
- Barbosa, M. L., da Silva, T. G. F., Zolnier, S., e Silva, S. M. S., e Ferreira, W. P. M. (2018). Environmental variables influencing the expression of morphological characteristics in clones of the forage cactus. *Revista Ciencia Agronomica*, 49(3), 399–408. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180045>
- Costa, S., Bezerra, A., Araújo, A., Silva, M., Neto, J., Alves, R., e Souza, L. (2021). Dinâmica espaço-temporal das anomalias de precipitação em uma região semiárida, Nordeste do Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 18(1), 14–0. <https://doi.org/10.21168/rega.v18e14>
- Cruz Neto, J. F. da, Jardim, A. M. da R. F., Souza, L. S. B. de, e Silva, T. G. F. da. (2021). Desertificação: uma visão geral dos processos e conceitos, fundamentados em aplicação de índices orbitais através do sensoriamento remoto. *Research, Society and Development*, 10(11), e585101119950. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19950>
- Diniz, W. J. da S., da Silva, T. G. F., Ferreira, J. M. da S., dos Santos, D. C., de Moura, M. S. B., de Araújo, G. G. L., e Zolnier, S. (2017). Forage cactus-sorghum intercropping at different irrigation water depths in the Brazilian Semiarid Region. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 52(9), 724–733. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000900004>
- Foster, T., Brozović, N., Butler, A. P., Neale, C. M. U., Raes, D., Steduto, P., Fereres, E., 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>
- Gao, Y., Zhang, M., Yao, C., Liu, Y., e Wang, Z. (2021). Increasing seeding density under limited irrigation improves crop yield and water productivity of winter wheat by constructing a reasonable population architecture. *Agricultural Water Management*, 253(April), 106951. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106951>
- Hadebe, S. T., Mabhaudhi, T., e Modi, A. T. (2017). Water use of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) in response to varying planting dates evaluated under rainfed conditions. *Water*, 43(1), 91–103. <https://doi.org/10.4314/wsa.v43i1.12>
- Iqbal, M. A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., e del Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135, 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.012>
- Jardim, A. M. da R. F., Silva, T. G. F. da, Souza, L. S. B. de, Araújo Júnior, G. do N., Alves, H. K. M. N., Souza, M. de S., Araújo, G. G. L. de, e Moura, M. S. B. de. (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, 104464. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104464>
- Jin, X. L., Feng, H. K., Zhu, X. K., Li, Z. H., Song, S. N., Song, X. Y., Yang, G., Xu, X. G., e Guo, W. S. (2014). Assessment of the AquaCrop model for use in simulation of irrigated

- winter wheat canopy cover, biomass, and grain yield in the North China plain. *PLoS ONE*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086938>
- 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., e 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*, 11(8), 1–12. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081647>
- Lu, H. dong, Xue, J. quan, e Guo, D. wei. (2017). Efficacy of planting date adjustment as a cultivation strategy to cope with drought stress and increase rainfed maize yield and water-use efficiency. *Agricultural Water Management*, 179, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.09.001>
- Malik, W., Boote, K. J., Hoogenboom, G., Cavero, J., e Dechmi, F. (2018). Adapting the CROPGRO model to simulate alfalfa growth and yield. *Agronomy Journal*, 110(5), 1777–1790. <https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0680>
- Mhizha, T., Geerts, S., Vanuytrecht, E., Makarau, A., e Raes, D. (2014). Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA*, 40(2), 233–243. <https://doi.org/10.4314/wsa.v40i2.5>
- Mugiyo, H., Mhizha, T., Chimonyo, V. G. P., e Mabhaudhi, T. (2021). Investigation of the optimum planting dates for maize varieties using a hybrid approach: A case of Hwedza, Zimbabwe. *Heliyon*, 7(2), e06109. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06109>
- Nyakudya, I. W., e 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>
- Parker, L., Bourgoin, C., Martinez-Valle, A., e Läderach, P. (2019). Vulnerability of the agricultural sector to climate change: The development of a pan-tropical Climate Risk Vulnerability Assessment to inform sub-national decision making. *PLoS ONE*, 14(3), 1–25. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213641>
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., e Fereres, E. (2012). AquaCrop Reference Manual - AquaCrop Version 4.0. User Manual, June, 1–17. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&eq=intitle:AquaCrop+Reference+Manual#0>
- Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A. C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T. A. M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., e Jones, J. W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3268–3273. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110>
- Silva, M. J., Queiroz, Maria Gabriela Jardim, A. M. da R. F., Araújo Júnior, G. do N., e da Silva, T. G. F. (2018). Revista Engenharia na Agricultura. *Engenharia na Agricultura*, 240–249. <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i3.889>
- Silva, T. G. F., Jardim, A. M. R. F., Diniz, W. J. S., Souza, L. S. B. De, Júnior, N. A., Silva, G. Í. N., Alves, C. P., Souza, C. A. A. De, e Morais, J. E. F. De. (2023). Profitability of using irrigation in forage cactus-sorghum intercropping for farmers in semi-arid environment 1 Rentabilidade do uso da irrigação no consórcio palma-sorgo para agricultores em ambiente semiárido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 132–139.

- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., e Fereres, E. (2011). Literature. *Agronomy Journal*, 101(3). <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Tinôco, I. C. M., Bezerra, B. G., Lucio, P. S., e Barbosa, L. de M. (2018). Characterization of rainfall patterns in the semiarid Brazil. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 41(2), 397–409. https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409
- Vieira, P. V. D., Freitas, P. S. L. De, Silva, A. L. B. R. Da, Souza, A. C. S., e Voroniak, J. M. (2021). Agronomic characteristics and grain yield of sorghum and maize hybrids grown with different sowing times1. *Revista Caatinga*, 34(4), 780–790. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n405rc>
- Vieira, R. M. S. P., Tomasella, J., Alvalá, R. C. S., Sestini, M. F., Affonso, A. G., Rodriguez, D. A., Barbosa, A. A., Cunha, A. P. M. A., Valles, G. F., Crepani, E., De Oliveira, S. B. P., De Souza, M. S. B., Calil, P. M., De Carvalho, M. A., Valeriano, D. M., Campello, F. C. B., e Santana, M. O. (2015). Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. *Solid Earth*, 6(1), 347–360. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>
- Watt, L. J., Bell, L. W., e Pembleton, K. G. (2022). A forage brassica simulation model using APSIM: Model calibration and validation across multiple environments. *European Journal of Agronomy*, 137, 126517. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126517>