



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
COLEGIADO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

JOSÉ IGOR MARTINS SODRÉ

**ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DE SEMEADURA PARA A
CULTURA DA SOJA POR MEIO DE MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA
NO OESTE DA BAHIA**

BARREIRAS - BA

2021

JOSÉ IGOR MARTINS SODRÉ

**ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DE SEMEADURA PARA A
CULTURA DA SOJA POR MEIO DE MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA
NO OESTE DA BAHIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade do Estado da Bahia (UNEB)
Campus IX, como requisito parcial para
avaliação e aprovação na Conclusão do Curso
de Engenharia Agrônômica.

Orientador: MSc. Silas Alves Souza
Coorientador: DSc. Marcos Antônio Vanderlei
Silva
Coorientador: MSc. Charles Cardoso Santana

BARREIRAS - BA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Sistema de Bibliotecas da UNEB

S679

Sodré, José Igor Martins

Estratégias de manejo de irrigação e de semeadura para a cultura da soja por meio de modelagem agrometeorológica no Oeste da Bahia / José Igor Martins Sodré. - Barreiras, 2021.

64 fls.

Orientador(a): Msc. Silas Alves Souza.

Coorientador(a): DSc. Marcos Antônio Vanderlei Silva;

Coorientador(a): Msc. Charles Cardoso Santana

Inclui Referências

TCC (Graduação - Engenharia Agrônômica) - Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Ciências Humanas. Campus IX. 2021.

CDD: 633



UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS HUMANAS
COLEGIADO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DE SEMEADURA PARA A CULTURA DA SOJA POR MEIO DE MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA NO OESTE DA BAHIA.

AUTOR: JOSÉ IGOR MARTINS SODRÉ

ORIENTADOR: MSc. SILAS ALVES SOUZA

COORIENTADOR: DSc. MARCOS ANTÔNIO VANDERLEI SILVA

COORIENTADOR: MSc. CHARLES CARDOSO SANTANA

Aprovado pela Banca Examinadora:

MSc. Silas Alves Souza
Orientador/Presidente

DSc. Marcos Antônio Vanderlei Silva
Coorientador

DSc. Alberto do Nascimento Silva
Examinador Interno

DSc. Evandro Chaves de Oliveira
Examinador Externo

Data de realização: 09 de dezembro de 2021.

A Deus, por te me concebido o dom da vida, meus pais, meus avós maternos, minha namorada e aos familiares que me apoiaram e incentivaram.

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e abençoar em todos os momentos da minha vida, me concedendo perseverança, sabedoria e equilíbrio.

À minha mãe, Dalvenice Martins Sodré (*in memoriam*), por ser exemplo de mulher a ser seguido, com seu espírito de bondade, simplicidade, caráter, por sua fé inabalável em Deus, muito amor no coração e seu incansável esforço em contribuir no princípio de formação intelectual e humano com muito amor e carinho.

Ao meu pai, José Rodrigues Sodré, pelo grande apoio moral, carinho, amor e incentivo, por sempre me fazer acreditar que iria dar certo e não me deixar desistir.

À minha madrasta, por ser uma mãe guerreira, carinhosa, amiga e por sempre ter acreditado em mim.

À minha namorada, por tornar meus dias mais felizes, pelo companheirismo, amor e carinho a mim atribuídos.

Aos meus avós maternos, pela grande contribuição, carinho e cuidado em todas as etapas da minha vida.

Aos meus avós paternos, pelo carinho e pelas contribuições em minha formação pessoal.

Ao meu orientador, MSc. Silas Alves Souza, pela sua amizade, admirável orientação, paciência e confiança, virtudes fundamentais para a elaboração e conclusão desse trabalho.

Ao meu professor e coorientador, DSc. Marcos Antônio Vanderlei Silva, por sempre acreditar e confiar no meu potencial, pelos admiráveis conselhos e conhecimentos transmitidos a mim ao longo do curso.

Ao meu coorientador, MSc. Charles Cardoso Santana, pela amizade, aprendizado e colaboração no desenvolvimento do trabalho.

À Universidade do Estado da Bahia (UNEB), pela oportunidade de realizar o excelente curso de Engenharia Agrônômica.

Ao Grupo de Agrometeorologia da UNEB (GAMU), pelas importantes contribuições e ótimas vivências, fundamentais para o desenvolvimento do trabalho. A todos os meus colegas e amigos que contribuíram de alguma forma pela minha evolução pessoal durante a graduação.

EPÍGRAFE

“Dificuldades preparam pessoas comuns para destinos extraordinários.”

C.S. LEWIS

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades físico-hídricas do solo observadas no Pivô 4 (P4), no Pivô 8 (P8) e no Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	26
Tabela 2: Informações referentes aos ciclos da cultura da soja cultivada no Pivô 4 (P4), no Pivô 8 (P8) e no Pivô 16 (P16) na Fazenda SAMA.	27
Tabela 3: Identificação das fases fenológicas nas datas das coletadas de dados da cultura da soja cultivada no Pivô 4 (P4), no Pivô 8 (P8) e no Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	27
Tabela 4: Parâmetros conservativos e de calibração utilizados no modelo AquaCrop para a cultura da soja, considerando o Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e o Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	36
Tabela 5: Critério de interpretação do desempenho do método de estimativa, pelo índice de concordância (c).	40
Tabela 6: Valores de produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimados pelo AquaCrop após a calibração, e mensurados em campo, considerando o Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8), Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	48
Tabela 7: Produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimadas pelo modelo AquaCrop calibrado, considerando diferentes níveis de lâminas de irrigação.	49
Tabela 8: Produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimadas pelo modelo AquaCrop calibrado, considerando a influência de déficit hídrico em fases fenológicas específicas.	51
Tabela 9: Produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimadas pelo modelo AquaCrop calibrado, considerando cinco datas de semeadura.	53
Tabela 10: Análise estatística do modelo AquaCrop. Erro Médio Absoluto (EMA), Índice de concordância de Willmontt's (d), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), a Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) e o Coeficiente de determinação (R ²).	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases fenológicas vegetativa e reprodutiva da cultura da soja.	21
Figura 2: Detalhamento da área de estudo através do software Google Earth.....	25
Figura 3: Interface do modelo AquaCrop.	29
Figura 4: Menu principal do software AquaCrop versão 6.1.....	30
Figura 5: Fluxograma esquemático do modelo AquaCrop com indicação das principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera.	32
Figura 6: Dados climáticos diários observados durante o ciclo da cultura da soja no Pivô 4 (P4) da Fazenda SAMA.....	41
Figura 7: Dados climáticos diários observados durante o ciclo da cultura da soja no Pivô 8 (P8) da Fazenda SAMA.....	42
Figura 8: Dados climáticos diários observados durante o ciclo da cultura da soja no Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.....	43
Figura 9: Comportamento da cobertura de dossel (CC%) da cultura da soja estimado pelo modelo AquaCrop após a calibração, e mensurado considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	44
Figura 10: Comportamento da evolução da biomassa (kg/ha) da cultura da soja estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e mensurada considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	45
Figura 11: Comportamento do coeficiente da cultura (K_c) da cultura da soja estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e utilizado pela Fazenda SAMA (FAO) no manejo de irrigação, considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	46
Figura 12: Comportamento da evapotranspiração da cultura da soja (E_{Tc}) estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e utilizada pela Fazenda SAMA para o manejo de irrigação, considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIBA – Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia
ANA - Agência Nacional de Águas.
B – Biomassa.
C – Índice de Confiança
CC - Cobertura verde do dossel.
Θcc – Capacidade de campo
CC% - Porcentagem de Cobertura do dossel
CD – Cobertura do Dossel
CI-E – Com Interrupção da Irrigação no Estádio de Enchimento de grãos
CI-F – Com interrupção da Irrigação no Estádio de Florescimento
CI-V – Com Interrupção da Irrigação no Estádio Vegetativo
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.
d - Índice de concordância de Willmontt
DAP – Dias após o plantio.
D% - Desvio
DS – Data de Semeadura
Ei = Valor estimado após a calibração do modelo
ET – Evapotranspiração.
EMA – Erro Médio Absoluto
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
ETc – Evapotranspiração total da cultura
ET0 – Evapotranspiração de referência
FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.
FC - Capacidade de campo
HI - índice de colheita.
IAF – Índice de área foliar.
IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
Kc – Coeficiente de cultivo
L – Lâmina de Irrigação
NSE – Eficiência de Nash Sutcliffe
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MATOPIBA – Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia
Mi = Valor mensurado em campo
P – Pivô
Pmp – Ponto de murcha permanente
R² - Coeficiente de determinação
RMSE – Raiz Quadrada do Erro Médio
SI – Sem interrupção de Irrigação
WP – Produtividade de água normalizada

SODRÉ, José Igor Martins. **Estratégias de manejo de irrigação e de semeadura para a cultura da soja por meio de modelagem agrometeorológica no Oeste da Bahia.** Orientador: Silas Alves Souza. 2021. 64 f. il. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Universidade do Estado da Bahia, Barreiras, 2021.

RESUMO

O clima desempenha uma função essencial para a produção agrícola, sendo esta diretamente afetada pelas suas mudanças. À medida que as variações climáticas ocorrem, as práticas de manejo da agricultura precisam ser revistas, especificamente a exigência de recursos hídricos e manejo de irrigação. Uma das alternativas utilizadas para viabilizar as projeções de cenários para o desenvolvimento das culturas, é através do uso de modelagem agrometeorológica. Dessa forma, o objetivo deste trabalho consistiu em calibrar o modelo AquaCrop para estimar a produtividade e biomassa da cultura da soja, e avaliar o impacto de diferentes estratégias de déficit hídrico e a semeadura em diferentes datas, para as condições da região Oeste da Bahia. O modelo foi parametrizado e calibrado usando dados de clima, solo, cultura e manejo, coletados em três pivôs ao longo de duas safras, que compreendem os anos agrícolas de 2019/2020 e 2020/2021 na Fazenda SAMA, localizada no município de Luís Eduardo Magalhães-BA. Após os dados serem inseridos no modelo, o modelo simulou a produtividade de grãos e o acúmulo total de biomassa para os três pivôs, e em seguida foi realizada a calibração do modelo. Após a calibração do modelo, foi realizada a simulação de cinco cenários de diferentes níveis de lâmina de irrigação, três cenários de aplicação de interrupção da irrigação em fases fenológicas específicas e, cinco diferentes datas de semeadura. O modelo foi avaliado utilizando as seguintes variáveis estatísticas: erro médio absoluto (EMA), índice de concordância de Willmott (d), raiz quadrada do erro médio (RMSE), a eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinação (R^2) e o índice de confiança (c). A simulação da produtividade da cultura da soja obtida através do modelo AquaCrop, se comparadas com o desempenho dos dados observados, apresentaram resultados satisfatórios, ressaltando a robustez e a praticidade do modelo. O modelo foi avaliado como ótimo para a estimativa da produtividade e da biomassa, com valor de R^2 igual a 0,99 para os três pivôs, e média de 0,998 para o coeficiente de Willmott (d) e o índice de concordância (c). De acordo com os cenários de níveis de lâmina de irrigação avaliados, o uso da lâmina de 75% atingiu maior produtividade da cultura da soja, sendo aproximadamente 102 kg/ha maior que na lâmina de 100%. As fases fenológicas de florescimento e enchimento de grãos da cultura da soja apresentaram maior sensibilidade ao déficit hídrico, quando comparadas com a aplicação de déficit na fase vegetativa e sem interrupção da irrigação em nenhuma das fases fenológicas. A última quinzena de outubro, que abrange duas épocas de semeadura, 18/10/2020 e 28/10/2020 é o período de plantio que viabiliza os máximos rendimentos estimados da cultura da soja no AquaCrop, em comparação aos rendimentos observados. Os resultados desse estudo mostram que o modelo pode ser aplicado para estimar a produtividade de safras futuras, contribuindo para o planejamento da produção de culturas agrícolas na região.

Palavras-chave: AquaCrop; Calibração de modelo, Cultura da soja; Déficit hídrico, Manejo de irrigação.

SODRÉ, José Igor Martins. **Irrigation and seeding management strategies for soybean crop using agrometeorological modeling in Western Bahia**. Advisor: Silas Alves Souza. 2021. 64 f. Il. Course Conclusion Paper (Graduate in Agronomic Engineering) – State University of Bahia, Barreiras, 2021.

ABSTRACT

The climate plays an essential role for agricultural production, which is directly affected by its changes. As climatic variations occur, agricultural management practices need to be revised, specifically the demand for water resources and irrigation management. One of the alternatives used to enable scenario projections for crop development is through the use of agrometeorological modeling. Thus, the objective of this work was to calibrate the AquaCrop model to estimate soybean crop yield and biomass, and to evaluate the impact of different water deficit strategies and sowing at different dates, for conditions in the western region of Bahia. The model was parameterized and calibrated using climate, soil, crop and management data, collected in three pivots over two harvests, comprising the 2019/2020 and 2020/2021 agricultural years at Fazenda SAMA, located in the municipality of Luís Eduardo Magallanes-BA. After the data were entered into the model, the model simulated grain yield and total biomass accumulation for the three pivots, and then model calibration was performed. After calibrating the model, a simulation of five scenarios of different levels of irrigation depth, three scenarios of application of irrigation interruption in specific phenological phases, and five different sowing dates were performed. The model was evaluated using the following statistical variables: mean absolute error (MAE), Willmott agreement index (d), root mean square error (RMSE), Nash and Sutcliffe efficiency (NSE), coefficient of determination (R^2) and the confidence index (c). The simulation of soybean crop yield obtained through the AquaCrop model, if compared with the performance of the observed data, presented satisfactory results, emphasizing the robustness and practicality of the model. The model was evaluated as excellent for the estimation of productivity and biomass, with a R^2 value equal to 0.99 for the three pivots, and an average of 0.998 for the Willmott coefficient (d) and the agreement index (c). According to the scenarios of irrigation depth levels evaluated, the use of the 75% depth reached higher soybean crop productivity, being approximately 1.5% higher than the 100% depth. The phenological stages of flowering and grain filling of the soybean crop showed greater sensitivity to water deficit, when compared to the application of deficit in the vegetative stage and without interruption of irrigation in any of the phenological stages. The last fortnight of October, which covers two sowing seasons, 10/18/2020 and 10/28/2020, is the planting period that enables the maximum estimated yields of the soybean crop in AquaCrop, compared to observed yields. The results of this study show that the model can be applied to estimate the productivity of future crops, contributing to the planning of agricultural crop production in the region.

Keywords: AquaCrop; Model calibration, Soybean culture; Water deficit, Irrigation management.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	9
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Região Oeste da bahia	16
2.2 A Cultura da soja	17
2.2.1 No mundo	17
2.2.2 No Brasil.....	18
2.2.3 No Oeste da Bahia	18
2.2.4 Fenologia e desenvolvimento	20
2.3 Importância do uso de modelos de simulação na estimativa da produtividade	21
2.4 Especificações do modelo AquaCrop	22
2.5 Aplicações do modelo AquaCrop	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Caracterização da região em estudo.....	25
3.2 Coleta de dados	25
3.2.1 Dados climáticos	25
3.2.2 Dados de solo	26
3.2.3 Dados da cultura	26
3.3 Modelo AquaCrop	29
3.3.1 Componente clima.....	33
3.3.2 Componente cultura.....	33

3.3.3 Componente solo	34
3.3.4 Componente manejo	34
3.4 Calibração do modelo AquaCrop	35
3.5 Simulação de cenários de produção de soja	36
3.6 Análise estatística dos dados	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1 Caracterização climática para os períodos de simulação.....	41
4.2 Calibração do modelo AquaCrop para a cultura da soja	44
4.3 Simulação de cenários de produção de soja	49
4.3.1 Diferentes níveis de lâminas de irrigação.....	49
4.3.2 Déficit hídrico em fases fenológicas específicas	51
4.3.3 Datas de semeadura	53
4.4 Avaliação estatística do modelo AquaCrop.....	54
5 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a região Oeste da Bahia tem se destacado na produção de soja (*Glycine max* (L.) Merrill). Na safra 2020/2021, a expansão da produtividade em conjunto com o crescimento da área plantada em 4,9% em comparação a safra anterior, contribuiu para uma produção de soja de aproximadamente 6,8 milhões de toneladas, sendo responsável por 5% da produção nacional, em uma área plantada de 1,7 milhões de hectares. O estado da Bahia alcançou, na safra 2020/2021, a posição de maior produtor de soja do Brasil, com produtividade média igual a 67 sacas/hectare, representando um aumento de 7,5% em relação à safra de 2019/2020 (AIBA, 2021).

O crescimento contínuo na produção de soja, bem como, de outras culturas de importância econômica na região Oeste da Bahia, se deve, principalmente, pela utilização de altas tecnologias, como o melhoramento genético, manejo de solo e manejo de irrigação. Este pacote tecnológico associado ao estudo das proposições dos fatores agrometeorológicos é uma importante estratégia no planejamento de um sistema agrícola.

O conceito de gestão de irrigação eficiente é complexo, e no seu sentido estabelece relações mais amplas de gerenciamento de água e equipamentos, com objetivo de ajustar a quantidade e o tempo de aplicação da água. O manejo de irrigação adequado, não deve ser apontado como uma etapa independente no sistema de produção agrícola, que tem por vez, o compromisso com a produtividade da cultura explorada, por outro lado, utiliza-se os recursos hídricos de forma eficiente e promove a proteção ambiental (CAMARGO, 2016).

Frente as mudanças climáticas e as maiores probabilidades de ocorrência de quebra de safra, devido a essas mudanças, a irrigação é, atualmente, uma peça chave para a produtividade de várias culturas, promovendo maior estabilidade na produção agrícola. A irrigação está diretamente associada ao sistema planta, água, clima e solo. Portanto, é necessário compreender a interação entre esses fatores e como estes podem influenciar na produção, visando aumentar a produtividade e a qualidade do produto, e reduzir o risco que quebra de safra (BISPO et al., 2017).

Neste contexto, os modelos agroclimáticos têm se tornado importante ferramenta na agricultura. A modelagem é considerada uma excelente forma de fornecer o conhecimento da pesquisa científica para o produtor ou profissionais da área (ZHAO et al., 2019; SIHAG e PRAKASH, 2019). O emprego de modelos agroclimáticos para mensurar os efeitos sobre o desenvolvimento e produção de soja, podem auxiliar no entendimento técnico e científico dos fatores que podem comprometer a estabilidade da cultura na região. Uma grande possibilidade

é a utilização de modelos computacionais agrícolas de prognóstico de safras, podendo, por exemplo, contribuir para melhorar a qualidade da produção, elevar a produtividade, reduzir os riscos por ocorrência de doenças e pragas agrícolas, como também, tornar-se melhor o custo de produção da lavoura (AVADHANI et al., 2019).

Em contrapartida, a utilização de modelos agroclimáticos em condições diferentes dos locais onde foram criados é limitada, havendo, portanto, a necessidade de calibrações. Dessa maneira, o modelo de estimativa de produtividade AquaCrop foi desenvolvido com o intuito de melhorar as irregularidades de determinada região, estabelecendo uma estabilidade entre precisão, facilidade e robustez. O Software AquaCrop é um modelo agrometeorológico que exige mínimos dados de entrada, e serve para simular o comportamento e o rendimento de determinada cultura em campo, aproximando-se dos cenários reais, contribuindo para auxiliar o produtor na tomada de decisões no campo (FREITAS, 2018).

Diante da importância da região Oeste da Bahia na produção de soja, a utilização e calibração de modelos de simulação, visando identificar qual a melhor estratégia de manejo, antes da efetiva implantação em campo, a fim de se obter os melhores rendimentos das culturas, são extremamente importantes e necessárias. Neste sentido, o objetivo deste trabalho consistiu em calibrar o modelo AquaCrop para estimativa da produtividade e biomassa da cultura da soja, e avaliar o impacto de diferentes estratégias de déficit hídrico e a semeadura em diferentes datas, para as condições da região Oeste da Bahia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Região Oeste da Bahia

A região Oeste da Bahia é composta em sua maior parte pelo bioma Cerrado, que inclui os municípios de São Desidério, Jaborandi, Correntina, Luís Eduardo Magalhães, Cocos, Baianópolis e Riachão das Neves, Formosa do Rio Preto e Barreiras. O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil, respondendo por 24% da área do país. Desde a década de 1960, ocorreram muitas mudanças no uso do solo na região do Cerrado, que estão relacionadas à construção de Brasília e à consequente abertura de estradas ligando o Nordeste ao resto do país e a expansão do agronegócio (AIBA, 2018).

A área é caracterizada pela agricultura eficiente, pelo uso de ferramentas e maquinários de alta tecnologia e pela adoção de boas práticas agrícolas, que agregam valor não só aos produtores, mas também ao meio ambiente. Além disso, devido à abundância de recursos hídricos subterrâneos, os produtores da região desenvolveram a agricultura irrigada, tornando-a um empreendimento econômico, social e ambientalmente lucrativo. O Urucuia é um manancial de grande disponibilidade hídrica subterrânea, distribuído nos estados da Bahia, Tocantins, Goiás, Piauí, Minas Gerais e Maranhão. A maior parte do aquífero está localizada na Bahia e, de acordo com a ANA (Agência Nacional de Águas), 65% de suas reservas estão localizadas no Oeste da Bahia (CABRAL, 2020).

O Oeste da Bahia é conhecido por suas atividades agrícolas em larga escala, utilizando tecnologia avançada, proporcionando altos rendimentos para as safras de soja, milho e algodão. Ações como correção de solo, características territoriais e políticas públicas transformaram o agronegócio da região, tornando-a uma das áreas mais produtivas do país, consolidando o agronegócio e as exportações, sendo considerada o maior polo alimentar do Nordeste brasileiro. O Oeste da Bahia tem a produção de soja como principal ramo da agricultura, responsável por 69% da área agrícola, e culturas como milho e algodão complementam a matriz produtiva local. A Bahia vende 50% da soja natural para indústrias da região e exporta 47% de sua produção para países como China (66%), Japão (11%) e Holanda (8%) para promover o desenvolvimento econômico (AIBA, 2016).

Com a definição clara do período chuvoso, a extensão desta grande área tem proporcionado condições para o desenvolvimento de diversas atividades agrícolas, já consolidadas. A região é caracterizada pela variação de clima úmido, úmido a subúmido e seco a subúmido. Conforme a classificação de Köppen o clima é Aw, isto é, típico de savana,

com inverno seco (KOPPEN, 1948), possui uma estação seca, de maio a outubro, e outra chuvosa, de novembro a abril, com precipitação pluviométrica média anual de 500 a 1500 mm e amplitude média anual de temperatura entre 21,3° e 27,2°C e temperatura média do ar do mês mais frio superior a 18° C. A vegetação é predominantemente de cerrado arbóreo aberto sem florestas de galeria. Os solos são classificados como latossolo vermelho-amarelo-álico e areia quartzosa álica, sendo que, o terreno plano e a existência de bacias hidrológicas podem apoiar projetos de irrigação, incluindo rios perenes e grandes volumes de água. (MENDONÇA, 2006; SOUZA et al., 2010).

2.2 A cultura da soja

2.2.1 No mundo

O Departamento de Agricultura Americano – USDA estimou que a produção mundial de soja para a safra 2021/2022 deverá totalizar 385,53 milhões de toneladas. Para o ano de 2020/21, a estimativa para a produção global de soja foi de 362,95 milhões de toneladas. Dessa maneira, o Brasil conquista o posto de maior produtor de soja em escala mundial, com 33% de toda produção geral no mundo, logo em seguida vêm os Estados Unidos com 32,85% da produção mundial e, posteriormente, a Argentina com 15,80% da produção mundial. Juntos, estes três países são responsáveis por 81,65% da safra mundial (USDA, 2021).

Nos dias atuais, os Estados Unidos, Brasil e Argentina, são responsáveis pela produção global de soja (Yu et al., 2019). Nos últimos 30 anos, foi a cultura que mais cresceu no Brasil, responsável por 49% da área de cultivo de grãos, rendendo aproximadamente 114 milhões de toneladas e gerando diretamente receitas de mais de 120 bilhões de reais (MAPA, 2014). Em todas as regiões do mundo o desenvolvimento sustentável da produção de soja está ameaçado por conta das condições climáticas, por exemplo, o déficit hídrico foi identificado como o principal fator ambiental de restrição à produção (ZIPPER et al., 2016).

O consumo de soja e seus derivados continua crescendo globalmente. Inicialmente, concentrou-se em países desenvolvidos e agora se expandiu para novas regiões. Isso se deve principalmente ao aumento da renda do consumidor e às mudanças nos hábitos de consumo. Porém, como consequência, além do aumento dos fluxos comerciais, existem diferenças regionais na demanda e na concentração da produção em alguns países (ZEMOLIN, 2013).

2.2.2 No Brasil

A soja é atualmente a oleaginosa mais plantada no Brasil e no mundo (BRIDA, 2017), com uma produção global de aproximadamente 351,311 milhões de toneladas, e a área colhida em 2016/2017 foi de 12,095 milhões de hectares (EMBRAPA, 2017). Na safra 2017/2018, o Brasil produziu aproximadamente 117 milhões de toneladas de grãos, ocupando o segundo lugar no mundo depois dos Estados Unidos (CONAB, 2018).

A soja é a cultura que mais cresceu no Brasil nos últimos trinta anos, respondendo por 49% da área cultivada para a produção de alimentos. A representação das terras agricultáveis está relacionada aos avanços tecnológicos no manejo, fertilizantes, cultivares e agroquímicos e na eficiência do produtor (CONAB, 2017).

O Brasil possui um grande território e cultivo de soja, ocupando o segundo lugar no ranking mundial de produção (BALBINOT JÚNIOR et al., 2017). Em 2019, a área de plantio de soja equivale a 36,5 milhões de hectares no país (CONAB, 2019).

Uma das técnicas que viabilizaram o cultivo de soja em diversos territórios do Brasil e em suas diferentes condições edafoclimáticas é o melhoramento genético, por meio da obtenção de variedades cultivadas que se adaptem a essas condições. Na década de 1980, as primeiras cultivares foram introduzidas em áreas de baixa latitude do Brasil, trazendo avanços para regiões antes subestimadas (DALL'AGNOL, 2017).

Existem apenas duas formas de usar a produção, uma é expandir a fronteira agrícola que atingiu seu limite e a outra é aumentar a produtividade. Para ampliar a produtividade, é fundamental utilizar uma série de pacotes de tecnologia, abrangendo além do melhoramento genético, melhores estratégias de manejo da cultura.

De acordo com Freitas (2011), os fatores que mais contribuem para o crescimento das culturas incluem: o uso de alta tecnologia relacionada ao manejo adequado do solo; a pesquisa e criação de cultivares adaptadas às mais diversas regiões do Brasil e suas condições edafoclimáticas; e o uso de máquinas agrícolas de alto desempenho para aumentar a produtividade e reduzir a perda de grãos nas lavouras.

2.2.3 No Oeste da Bahia

A soja é a principal atividade agrícola do Oeste da Bahia, que em 2018 representava 58,8% do total das terras agricultáveis da região. Atualmente, a soja no Oeste da Bahia responde por 5,3% da produção nacional e 54,4% no Nordeste. A região é conhecida por sua

atuação em larga escala, empreendedorismo e alto nível nos processos produtivos, e se tornou um modelo de crescimento agrícola e uso de tecnologias avançadas (SEAGRI, 2018).

As sementes produzidas no Oeste da Bahia são conhecidas pela alta qualidade e ocupam uma posição sólida no mercado de sementes. A época de plantio da cultura da soja vai da segunda quinzena de setembro a novembro. As variedades utilizadas na região têm uma duração no ciclo de 100 a 140 dias, e a safra vai de fevereiro a abril. As variedades utilizadas são principalmente do grupo de maturidade de ciclo tardio (8,2 a 9,3) (SILVA, 2016). Além disso, também são utilizadas cultivares geneticamente modificadas, que apresentam como principal vantagem a resistência a lagartas e ao herbicida glifosato (MENEGATTI; VILELA et al., 2016).

Em nota técnica emitida pela Fundação – BA, em que trata da importância das estratégias de manejo visando conter a proliferação da ferrugem asiática na região Oeste da Bahia, orienta aos produtores que realizem a semeadura no início do período indicado, utilizar variedades de soja de ciclo precoce, promover o estabelecimento de janelas de semeaduras objetivando diminuir a quantidade de aplicação de fungicidas, eliminar o cultivo de soja na entressafra, monitorar a lavoura a partir do início de desenvolvimento da cultura e priorizar o uso de cultivares que conferem resistência, visando a diminuição e o controle da ferrugem asiática (FUNDAÇÃO BA, 2019).

Na segunda edição da estimativa de Pesquisa da Agricultura de Irrigação por pivô Central no Brasil, a área equipada com esse sistema de irrigação no Oeste da Bahia aumentou exponencialmente de 1985 a 2017, de 3.056 hectares em 1985 para aproximadamente 150.000 hectares (ANA, 2017). Um fator significativo no desenvolvimento das fronteiras da agricultura Leste-Oeste da Bahia é a expansão da tecnologia, onde as chuvas se concentram a 100 quilômetros da fronteira com a Serra Geral de Goiás (GASPAR, 2007) para irrigação.

Conforme apontado por Albuquerque (2015), às propriedades com pivô central localizam-se nas áreas mais isoladas no limite do semiárido. Nessas áreas, as chuvas são menos favoráveis, mas a queda no valor de mercado das terras torna a área atraente para a instalação de um sistema produtivo. O mesmo autor afirma ainda, que a produtividade alcançada pela cultura da soja irrigada aumentou 2,4 vezes em relação à produção de sequeiro.

Do total de municípios que compõem a região oeste da Bahia, sete estão entre as dez cidades com mais irrigação do país. São eles: Barreiras, São Desidério, Luís Eduardo Magalhães, Jaborandi, Riachão das Neves, Correntina e Cocos. Por exemplo, na cidade de

Jaborandi, o número de pivôs centrais aumentou de 11 equipamentos em 1989 para 163 equipamentos em 2014 (ALL NIPPON AIRWAYS, 2016; SOUZA, 2017).

2.2.4 Fenologia e desenvolvimento

A soja é uma cultura anual da família das leguminosas Fabaceae. É uma planta anual ereta, herbácea e possui crescimento determinado ou indeterminado. O ciclo da cultura da soja pode sofrer variação de 75 dias (precoce) a 200 dias (tardio). No decorrer do ciclo da cultura, a altura da planta pode variar de 30 para 200 cm, o que afetará o número de estruturas vegetativas e assim por diante. A variabilidade das características morfológicas é, na maioria das vezes, influenciada pelo ambiente (MÜLLER, 1981). Além disso, seu ciclo pode ser dividido em maturação precoce, maturação semiprecoce, maturação média e maturação tardia (SILVA, 2019). O desenvolvimento da planta de soja é compreendido por duas fases distintas, a fase vegetativa e reprodutiva

Devido à importância econômica da cultura da soja, muitos estudos têm sido realizados na busca de variedades mais adaptáveis e de maior rendimento, que apresentam maiores percentuais de proteína, melhor qualidade do óleo e maior resistência a doenças e insetos-praga e outras características que podem refletir em altos índices de rendimento produtivo. Por exemplo, a semeadura desempenha um papel vital na agricultura e, se feita corretamente, conduz a altos rendimentos (FISS et al., 2018).

Tendo em vista promover o estabelecimento do estande de plantas ideal, de acordo com a recomendação de cada variedade, é imprescindível a adoção de técnicas de manejo apropriadas. Portanto, contém sementes de alta qualidade relacionadas à plantabilidade e uniformidade, para que as safras e o desempenho da soja sejam bons para a evolução da cultura no campo (XAVIER et al., 2015). As variedades transgênicas são utilizadas em sistemas de produção de soja e tem como característica principal a tolerância a lagartas e ao herbicida glifosato (MENEGATTI; BARROS, 2007; VILELA et al., 2016).

No que se refere às características das sementes com qualidades fisiológicas destacam-se, a porcentagem e velocidade de emergência, comprimento das raízes e hipocótilos, vigor e envelhecimento rápido (características de armazenamento). Sementes com alto teor de amido, proteína e açúcar solúvel mobilizam mais reservas para o processo de germinação e podem fornecer mudas mais vigorosas para as lavouras (HENNING et al., 2010; NAKAO et al., 2018).

Para definir e descrever as fases fenológicas das plantas (FEHR e CAVINESS, 1977) propuseram o método mais comumente utilizado, considerando as duas fases principais de todo o ciclo da cultura: a fase vegetativa, desde a germinação e emergência até o início da floração e, a fase reprodutiva partindo da floração e estendendo-se até a maturidade fisiológica do grão (Figura 1).

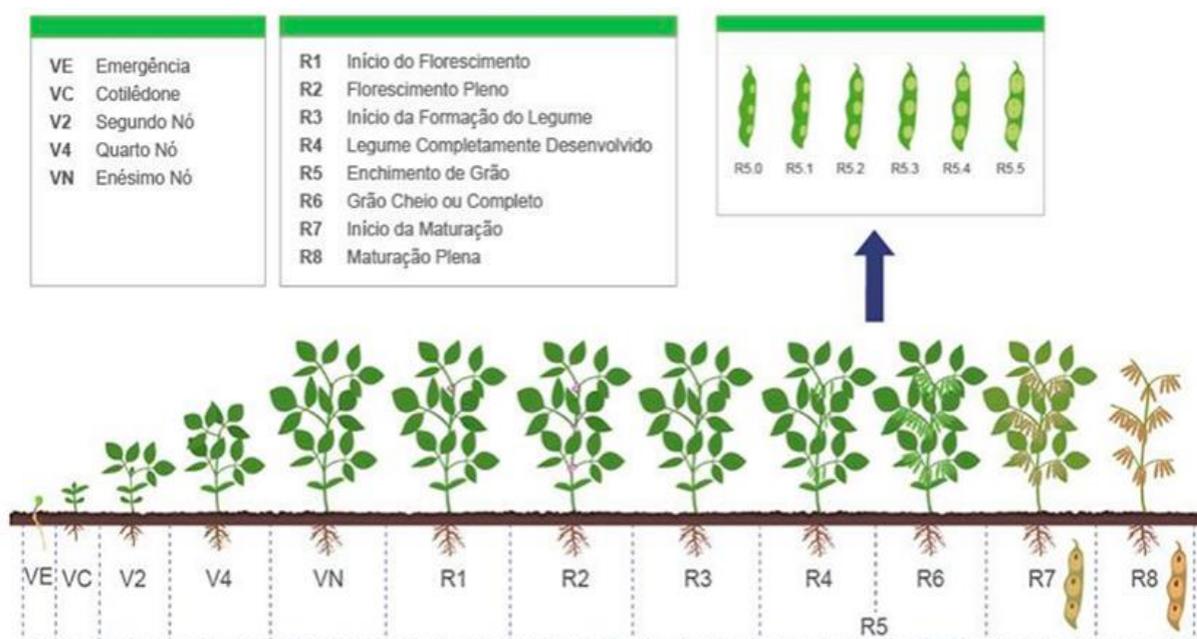


Figura 1: Fases fenológicas vegetativa e reprodutiva da cultura da soja.
Fonte: FEHR, CAVINESS (1977).

O desenvolvimento e a produtividade da soja sofrem influência das condições climáticas (tempo), sendo, a temperatura, o fotoperíodo e a água disponível os fatores que exercem maior influência. A temperatura está entre 20 ° C e 30 ° C, principalmente a temperatura próxima a 30 ° C, e a precipitação de 400 a 800 mm é propícia para a época de plantio (FARIAS et al., 2007).

2.3 Importância do uso de modelos de simulação na estimativa da produtividade

À medida que a população cresce, a demanda por alimentos se intensifica, o que tem levado pesquisadores, empresas e o setor público a encontrar novas respostas, conceitos e técnicas para quantificar a relação entre produtividade agrícola, solo, clima e gerência de empregos (SRIVASTAVA et al., 2017; 2019). Nesse caso, o modelo de simulação é uma ferramenta muito útil que pode auxiliar na escolha da melhor estratégia a ser adotada.

Os modelos de estimativa de produtividade são uma representação matemática da interação entre o genótipo e o ambiente, sob a influência de diferentes práticas de manejo. Portanto, esses modelos simulam os processos biofísicos relacionados à assimilação de carbono e alocação de carboidratos nos diferentes estágios fenológicos das culturas, bem como a resposta das culturas aos fatores ambientais (LOBELLI, CASSMAN, FIEDL, 2009; VAN ITERSUM et al., 2013).

Portanto, modelos de simulação podem ser usados para alterar os efeitos da variabilidade e das mudanças climáticas nas lavouras. Nesse sentido, é importante avaliar possíveis mudanças na produtividade da cultura devido a comportamentos de manejo (LOBELLI, CASSMAN, FIEL, 2009), como o uso de irrigação, diferentes tipos e quantidades de cobertura do solo, mudanças nas datas de semeadura e duração do ciclo da cultura.

A simulação agrometeorológica de crescimento e produção de culturas é uma ferramenta poderosa, onde é considerada uma excelente forma de levar conhecimento de pesquisa científica para produtores ou profissionais da área (ZHAO et al., 2019; SIHAG e PRAKASH, 2019). Por exemplo, o uso de modelos de previsão de safra pode ajudar a melhorar a qualidade da produção, maximizar a produtividade, reduzir o risco de pragas e doenças e reduzir os custos de produção (AVADHANI et al., 2019).

Por essas razões, o uso de modelos apresenta ferramentas úteis em ambientes dinâmicos e complexos, como a agricultura atual, que podem ser usados para estimar o impacto do clima atual e futuro (VAN KEULEN et al., 2019), variedade, data de plantio, tipo de solo, o impacto da produção agrícola (DOKOOHAKI et al., 2016) e segurança alimentar (OVANDO, 2018).

2.4 Especificações do modelo AquaCrop

O AquaCrop é um modelo de simulação agroclimático de referência, desenvolvido pela FAO (RAES et al., 2009), que tem por objetivo equilibrar a precisão, robustez e simplicidade de estimativa da evolução da cultura à demanda de água. Equiparado aos modelos mais clássicos (DSSAT e APSIM), este modelo necessita de um número mínimo de parâmetros de entrada. Além disso, a maioria desses parâmetros pode ser facilmente obtidos no local. Isso ocorre porque o modelo foi desenvolvido para uso em escala global.

O AquaCrop usa um fator de conversão denominado "índice de colheita" para simular a produtividade da biomassa produzida pelas plantas. A biomassa é calculada levando em

conta a transpiração real das culturas e parâmetros de produtividade fracionados por área e necessidade de água, intitulados “parâmetros de produção de água” (RAES et al., 2012).

Determinadas particularidades diferenciam o AquaCrop de outros modelos, tais como: a) a escala de tempo, com medidas diárias, sendo um intervalo próximo para se aproximar da escala 25 de tempo da resposta da cultura ao estresse hídrico; b) Não há órgão de separação de biomassa entre várias plantas, esta diferença é evitada por conta da complexidade e incerteza associada ao processo de separação, que ainda são os menos compreendidos e os mais difíceis de modelar; c) O desenvolvimento da folhagem é representado pela cobertura do dossel (CD) ao invés do índice de área foliar (IAF), CD apresenta uma simplificação significativa na simulação, combinando o crescimento foliar expandido, ângulo e distribuição em uma função de crescimento global, permitindo ao usuário inserir o valor observado de CD; e d) O uso de produtividade de biomassa padronizada relacionada à água (WP) para calcular a demanda de evaporação atmosférica e a concentração de CO₂. Essas particularidades, confere ao modelo, uma ampla gama de recursos de extrapolação, que podem ser usados em diferentes locais, estações e climas, e podem incluir cenários climáticos futuros (STEDUTO et al., 2009).

2.5 Aplicações do modelo AquaCrop

O modelo de simulação AquaCrop, possibilita a suposição de cenários adequados para a expansão e crescimento da planta, sendo utilizado como base para a tomada de decisão e manejo da lavoura, podendo determinar a melhor época de plantio, seleção de variedades, análise de risco e investimento, visando atingir a melhor produtividade e solucionar problemas, principalmente relacionados ao período de seca (OLIVEIRA, 2018).

Potencializar a utilização da água para cultivo irrigado é viável com um ajuste do manejo, no qual está de modo direto associado à simulação correta da evapotranspiração real da cultura. Desse modo, de acordo com os resultados obtidos nesse trabalho, o modelo FAO56 DUAL foi o que apresentou melhores resultados em estimar evapotranspiração real da soja, onde o NSE alternou entre 0,42 e 0,83. Já o AquaCrop, obteve um NSE de 0,43, e um valor médio de 0,48, comprovando a eficácia e robustez do modelo (ALVES et al., 2021).

Em estudos realizados por Markovic (2020), em Condado de Osijek-Baranja no leste da Croácia, foi realizada a calibração do modelo AquaCrop para estimar a produtividade de milho e soja irrigada e não irrigada. Os resultados mostraram que em condições irrigadas, não houve alterações na produtividade de milho, e sob cultivo irrigado ocorreu um aumento. Já para a soja, ocorreu um aumento de produtividade em cultivo sequeiro e irrigado.

Segundo Silva et al. (2018), no estudo de estimativa do rendimento em grãos da soja na área do MATOPIBA, os resultados alcançados na verificação mostram que o modelo AquaCrop pode ser usado para prever a produtividade total da soja, e sua confiabilidade e precisão estão dentro de um intervalo aceitável no que se refere às mudanças climáticas regionais.

Um estudo de parametrização e validação foi realizado por Alencar (2014), e Battisti et al. (2017) executaram uma pesquisa comparativa com modelos parecidos para o ciclo de cultivo da soja. Em conformidade com esses estudos, a parametrização é imprescindível para a aplicação de modelos de balanço de água no solo em situações de campo. Desse modo, a utilização de modelagem agrometeorológica para avaliar os parâmetros do AquaCrop permite contribuir na escolha de variáveis de entrada para pesquisas adicionais de calibração e validação de campo, podendo conduzir os esforços de estudos para componentes com maior efeito nos resultados (STRICEVIC et al., 2011; NYAKUDYA, STROOSNIJDER, 2014).

Silva (2018) após estudo na região do MATOPIBA, concluiu, que usar o modelo AquaCrop em condições controladas de gestão de água é mais eficaz do que em condições naturais. Além disso, em condições de sequeiro, as plantas sofrerão déficit hídrico em alguns casos, o que afeta a produtividade total da área.

Oliveira (2018) analisou a sensibilidade do modelo AquaCrop para determinar o período ótimo de semeadura para as culturas de milho e soja. Os resultados mostram que o AquaCrop pode estimar de forma abrangente a produtividade da soja e do milho, havendo a possibilidade de ser aplicado para contribuir nos estudos e melhorar a produtividade das lavouras da região, além de prever o melhor período para plantio.

Abedinpour et al. (2021) utilizando o modelo AquaCrop, avaliou o comportamento da soja em diferentes datas de plantio e diferentes níveis de irrigação. Com base nesses estudos, o modelo obteve uma resposta razoavelmente boa em prever os efeitos das decisões distintas de manejo para rendimento de grãos e biomassa. Dessa maneira, recomenda-se que o modelo pode ser utilizado para simular a produtividade de grãos e da água para diferentes lâminas de irrigação e datas de semeadura, sob um grau de confiabilidade razoavelmente alto.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da região em estudo

O estudo foi realizado considerando dados coletados em três pivôs centrais, localizados na fazenda SAMA (Latitude. -12,214027, Longitude. -45,958592 e Altitude de 702 m), situada em Luís Eduardo Magalhães, na região Oeste da Bahia. O sistema de cultivo da fazenda é todo irrigado, totalizando 16 pivôs centrais. Os pivôs selecionados para o estudo foram: Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e o Pivô 16 (P16), conforme apresentados na Figura 2. Nos três pivôs centrais selecionados para o estudo cultivou-se a mesma variedade de soja, diferentemente dos demais pivôs. As principais culturas cultivadas na fazenda é soja, milho e trigo. Além dessas, cultiva-se milheto para formação de palhada.



Figura 2: Detalhamento da área de estudo através do software Google Earth.

3.2 Coleta de dados

3.2.1 Dados climáticos

Os dados de clima foram provenientes da Estação Meteorológica Automática (EMA) da Agrosystem, modelo Davis Vantage Pro2TM instalada na fazenda, a aproximadamente 1,7

Km dos pivôs analisados. A EMA utilizada possui um sistema Datalogger que permite o armazenamento da série histórica dos dados. Para este estudo foram obtidos dados diários para o período de 01/2019 a 10/2020, abrangendo as safras de cultivo da soja nos três pivôs de estudo. As variáveis obtidas foram: Precipitação (Prec), Radiação solar (Rs), Umidade Relativa do ar (UR), Temperatura mínima do ar (Tn), Temperatura média do ar (Tmed), Temperatura máxima do ar (Tx) e Velocidade do vento.

3.2.2 Dados de solo

Os dados de solo necessários foram fornecidos pela própria Fazenda SAMA. Foram necessários dados referentes a propriedades físico-hídricas do solo (Umidade na Capacidade de Campo (Θ_{cc}) e Umidade no Ponto de Murcha Permanente (Θ_{pmp})), densidade do solo e a textura do solo (Areia, Silte e Argila). Para todos os dados de solo foram consideradas as camadas de 0-20 e 20-40 cm. Na Tabela 1, estão apresentados os valores correspondentes as propriedades físico-hídricas do solo observados nos três pivôs de estudo.

Tabela 1: Propriedades físico-hídricas do solo observadas no Pivô 4 (P4), no Pivô 8 (P8) e no Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Camada (cm)	Pivô	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Ds (g cm ⁻³)	Θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)
0 - 20	P4	86,0	5,1	8,9	1,78	0,201	0,100
	P8	81,0	15,0	4,0	1,68	0,176	0,071
	P16	78,5	10,6	11,0	1,61	0,164	0,081
	Média	81,8	10,2	8,0	1,69	0,180	0,084
20 - 40	P4	87,8	7,4	4,9	1,74	0,193	0,099
	P8	82,0	16,0	2,0	1,65	0,175	0,073
	P16	72,9	15,7	11,4	1,58	0,158	0,079
	Média	80,9	13,0	6,1	1,66	0,175	0,084

Ds = Densidade do solo; Θ_{cc} = Umidade na Capacidade de Campo; e Θ_{pmp} = Umidade no Ponto de Murcha Permanente.

3.2.3 Dados da cultura

Foi utilizada neste estudo a cultura da Soja, sendo a principal *commodity* brasileira e de maior valor econômico do Oeste da Bahia. Nos três pivôs de estudo foram cultivadas a cultivar MSOY 8349. No P4 e no P16, o cultivo da soja ocorreu na safra de 2019/2020 e, no

P8, ocorreu na safra de 2020/2021. As informações referentes aos ciclos da cultura da soja cultivadas nos três pivôs estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Informações referentes aos ciclos da cultura da soja cultivada no Pivô 4 (P4), no Pivô 8 (P8) e no Pivô 16 (P16) na Fazenda SAMA.

Pivô	Cultivar	Data de semeadura	Data de emergência	Data de colheita	Duração do ciclo (dias)	Densidade de semeadura (plantas ha ⁻¹)
P4	MSOY 8349	31/10/2019	06/11/2019	20/03/2020	142	200.000
P8	MSOY 8349	28/10/2020	03/11/2020	16/03/2021	140	216.600
P16	MSOY 8349	07/11/2019	13/11/2019	21/03/2020	136	200.000

A fim de realizar a coleta de informações da cultura da soja em diferentes estádios fenológicos, foi realizado o acompanhamento da cultura a partir da emergência das plântulas até o final do ciclo da soja, com intervalos indefinidos.

Nos dias das coletas, apresentados na Tabela 3, foram obtidas as seguintes informações: Matéria Seca aérea (MSa), Índice de Área Foliar (IAF) e Cobertura do dossel (CC%).

Tabela 3: Identificação das fases fenológicas nas datas das coletadas de dados da cultura da soja cultivada no Pivô 4 (P4), no Pivô 8 (P8) e no Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

P4			P8			P16		
Data de coleta	DAS	Fase Fenológica	Data de coleta	DAS	Fase Fenológica	Data de coleta	DAS	Fase Fenológica
15/11/2019	15	V2	27/11/2020	28	V3	15/11/2019	8	V1
13/12/2019	43	R1	04/12/2020	35	V4	13/12/2019	36	V5
03/01/2020	61	R3	05/01/2021	67	R3	03/01/2020	57	R2
24/01/2020	85	R5	20/01/2021	82	R5	13/01/2020	67	R3
07/02/2020	99	R5	27/01/2021	89	R5	24/01/2019	78	R4
28/02/2020	120	R6	18/02/2021	111	R6	07/02/2020	92	R5
06/03/2019	127	R7	05/03/2021	126	R7	28/02/2020	113	R6
-	-	-	-	-	-	06/03/2019	120	R7

DAS = Dias Após a Semeadura.

Para mensurar a biomassa, o Índice de área foliar (IAF) e Cobertura do dossel (CC%), foram coletadas 25 plantas por pivô (5 plantas em 5 linhas de plantio diferentes), em uma área de 900 m² (quadrado de 30 x 30 m), localizada aleatoriamente dentro da área de abrangência dos pivôs. Cada linha com as 5 plantas representava uma repetição amostral. Após a coleta das plantas, era realizada a separação, individual, das folhas, hastes, raízes, vagens (a partir do

estádio R3) de todas as plantas coletadas, e, posteriormente, acondicionadas em saquinhos de papéis. Estes saquinhos eram levados para o laboratório para proceder a pesagem da biomassa verde. Na sequência, todo material era levado para a estufa de circulação de ar forçada, onde eram mantidas por 72 horas com uma temperatura de 105°C. Após isso, o material seco era novamente pesado e obtido a biomassa total.

O índice de área foliar (IAF) foi estimado através da Área Foliar (AF) média de cada planta, obtida através do software SisCob 1.0. Para isso, eram retiradas fotografias das folhas de cada planta, após a separação das estruturas da planta. As folhas eram colocadas em uma superfície branca, com adição de uma outra superfície (superfície de referência) com área conhecida e com coloração diferente do verde (folhas) e do branco (superfície). Após a seleção das fotografias, essas eram inseridas no software SisCob 1.0 e realizado o processamento das imagens, onde era feita a leitura da área representativa de cada coloração que constituía a fotografia. Após este processo obteve-se os valores de AF para cada planta coletada. O IAF de cada amostra foi determinado pela Equação 1.

$$IAF = \frac{AF}{S} \quad \text{Equação 1}$$

em que: AF é a área foliar da amostra, em m² e S a área do terreno ocupada pela amostra, em m².

A cobertura do dossel (CC%) foi calculada com base no IAF, conforme a Equação 2, descrita por Hsiao et al (2009).

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

Além das MSa, IAF e CC%, foram observadas as seguintes informações referentes a cultura: Fechamento do dossel, florescimento, duração da floração, senescência, maturação, índice de colheita, temperatura basal e superior, Kc máximo e espaçamento de semeadura. Todas estas informações foram utilizadas como dados de entrada no modelo AquaCrop.

3.3 Modelo AquaCrop

As simulações do crescimento e da produtividade da cultura da soja para os três pivôs foram realizadas através do modelo AquaCrop, desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, sigla do inglês *Food and Agriculture Organization*), conforme Raes et al. (2012) e Steduto et al. (2012). O AquaCrop é um modelo de simulação do crescimento e da produtividade de culturas herbáceas, que considera as condições hídricas do solo, fornecidas por irrigação suplementar ou total, escassez de água ou cultivo sob sequeiro e outros estresses abióticos (temperatura, fertilização, salinidade e carbono dióxido de carbono).

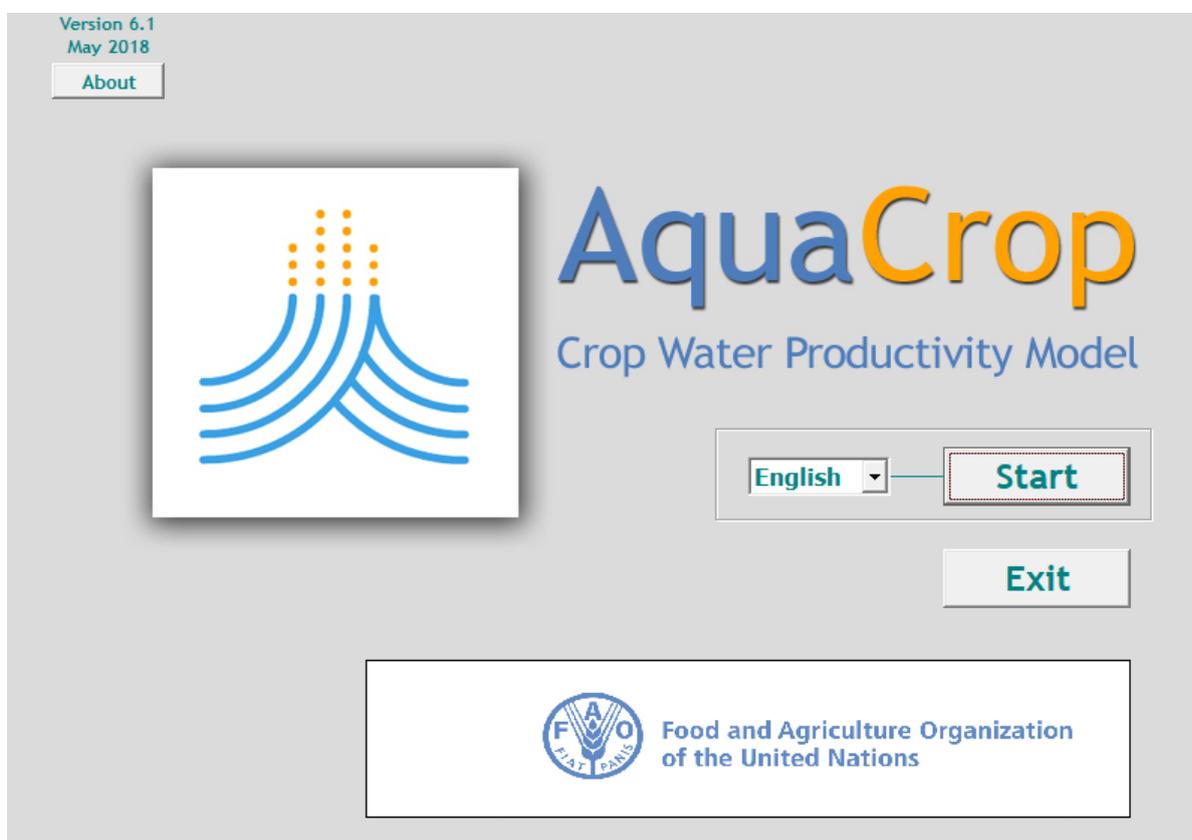


Figura 3: Interface do modelo AquaCrop.

Fonte: FAO, 2018.

O programa é dividido em dois painéis (*Environment and Crop/Ambiente e Cultura; Simulation/Simulação*). O menu principal (ambiente e cultura) é composto por quatro componentes (*Climate/clima, Crop/cultura, Management/manejo e soil/solo*), o que permite ao usuário realizar a inserção dos dados, visualizar os dados de entrada, simular o crescimento

e produção da cultura, visualizar os dados simulados e realizar ajustes, e avaliar as estimativas do modelo em relação aos dados reais observados em campo.

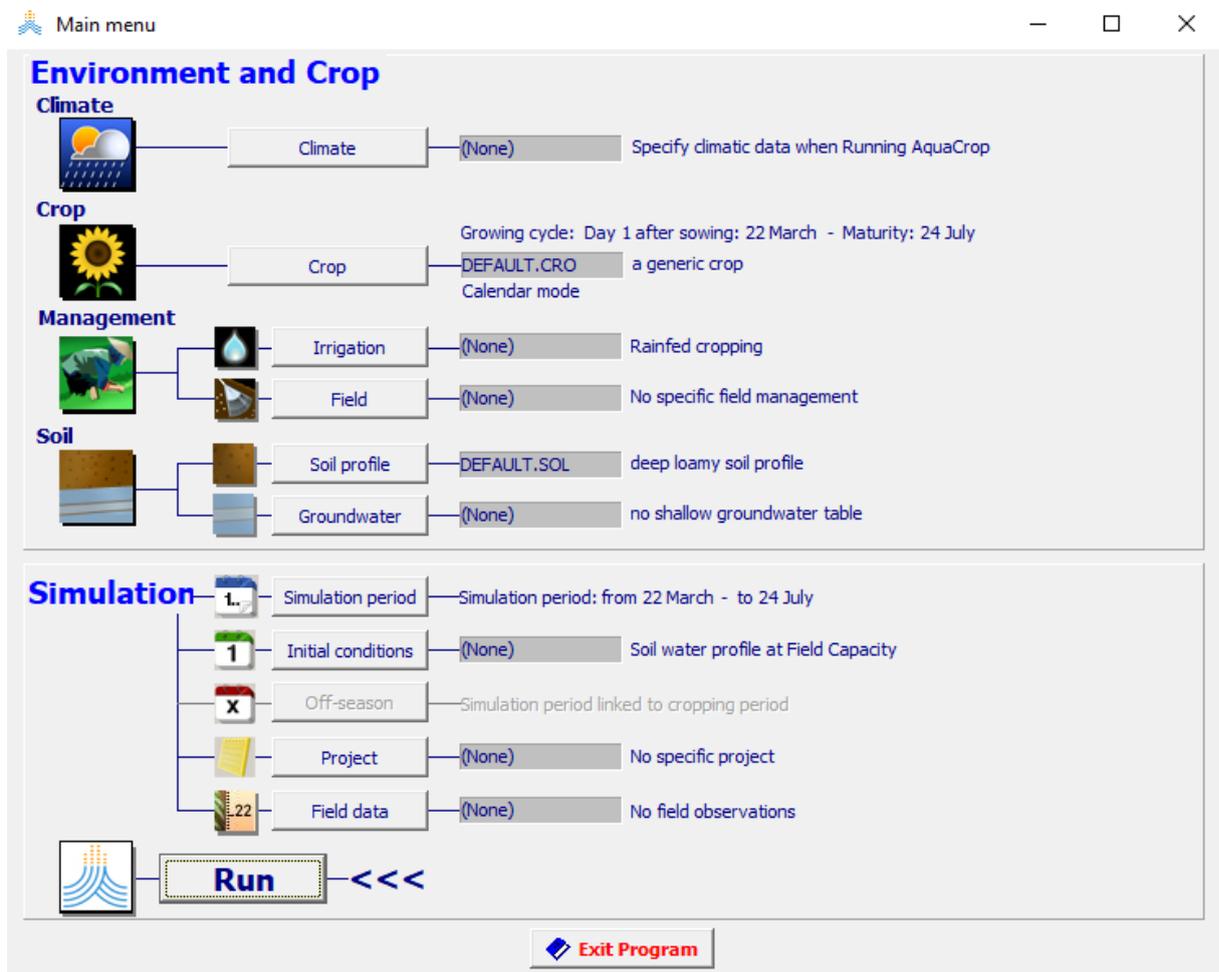


Figura 4: Menu principal do software AquaCrop versão 6.1.

Fonte: FAO, 2018

O modelo despontou-se com o intuito de substituir as metodologias empíricas determinadas por Doorenbos e Kassam (1979), em "*Irrigation and Drainage Paper*" que utilizam somente a Evapotranspiração (ET) para estimativa da produtividade das culturas. No AquaCrop a Evapotranspiração é agrupada em evaporação do solo e transpiração da cultura. Essa divisão tem por objetivo principal é minimizar a perda de água para a atmosfera, levando em conta que a transpiração é um processo que depende mais da planta, e resulta em um poder de ação maior sobre a evaporação. Assim como a ET, o programa divide a performance final da cultura em biomassa (B) e índice de colheita (HI), com a finalidade de impedir o confronto entre os impactos do déficit hídrico de água sobre a B e HI.

Além disso, no AquaCrop a evolução e o desenvolvimento da cultura são estimulados pela água, a estimativa dessa água é atingida pela transpiração que exerce uma relação linear com a taxa de crescimento da biomassa. Por fim, a transpiração é transformada em biomassa através do indicador de produção impulsionado pela água (STEDUTO et al., 2007). Os componentes fundamentais aplicados pelo AquaCrop para calcular a produtividade final da cultura, são calculados através produto entre a B, obtida através da produtividade da água normalizada (WP*), e em função do HI.

O modelo AquaCrop (RAES et al., 2011) é característico da engenharia, concentrado substancialmente em simular a produtividade e a biomassa das plantas cultiváveis em resposta à água disponível. Segundo Steduto et al. (2009), o AquaCrop evolui de uma aproximação do modelo de Doorenbos & Kassam (1979), no qual a relação da evapotranspiração (ET) é imprescindível no cálculo do rendimento (Y). O AquaCrop evoluiu por: (a) dividir a ET em transpiração da cultura (Tr) e evaporação hídrica em solos (E), o qual está relacionado com a quantificação de cada um dos componentes de forma separada (transpiração e evaporação) para definir a melhor estratégia de manejo que reduza a perda de água para a atmosfera. Uma vez que, tanto a evaporação quanto a transpiração são consideradas como processo de perda de água, sendo que perda por evaporação é menos benéfica para o sistema, pois não contribui efetivamente para a produção, pois a água não é aproveitada pela planta. Já a transpiração é um processo relacionado a planta. (b) desenvolvimento de um modelo simples que refletisse o crescimento e senescência do dossel como base para estimar a transpiração e (c) dividir os efeitos do estresse hídrico em quatro componentes: índice de colheita, senescência da copa, crescimento do dossel e transpiração. O AquaCrop é representado por uma função linear simples, como:

$$Y = B HI \quad \text{Equação 3}$$

em que, Y é a produtividade da cultura (kg/ha), B é a biomassa total (kg/ha) e HI é o índice de colheita (%). A produção diária de biomassa (g/m² ou ton/ha) acima do solo é dada por:

$$B = WP * x \sum \frac{Tr}{ET0} \quad \text{Equação 4}$$

$$Tr = Ks * Kcb * ET0 \quad \text{Equação 5}$$

em que, $WP^*(g/m^2)$ é a produtividade da água normalizada; ET_0 é a evapotranspiração de referência diária (mm) calculada usando a equação FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998); Tr é transpiração diária (mm); K_s é coeficiente de estresse hídrico; K_{cb} retrata o coeficiente basal da cultura que é proporcional a cobertura verde do dossel (CC); Y representa a produtividade da cultura (ton/ha); e HI simboliza o índice de colheita.

A Figura 4 descreve a metodologia de operação do AquaCrop, mostrando os principais componentes do continuum solo-planta-atmosfera, por exemplo: clima (precipitação pluvial, temperatura mínima (T_n), temperatura máxima (T_x), concentração de dióxido de carbono (CO_2) e evapotranspiração de referência (ET_0), fenologia, transpiração do dossel (Tr), cobertura do dossel (CD), irrigação (I), índice de colheita (HI), evaporação do solo (E), produção de biomassa no que se refere ao uso da água (WP), escoamento, 28 profundidade do sistema radicular, fertilidade do solo, infiltração, capilaridade, percolação profunda, absorção. Estresse hídrico prejudicando o desenvolvimento foliar [1], a senescência do dossel [2], condutância estomática (g_s) [3] e o índice de colheita (HI) [4].

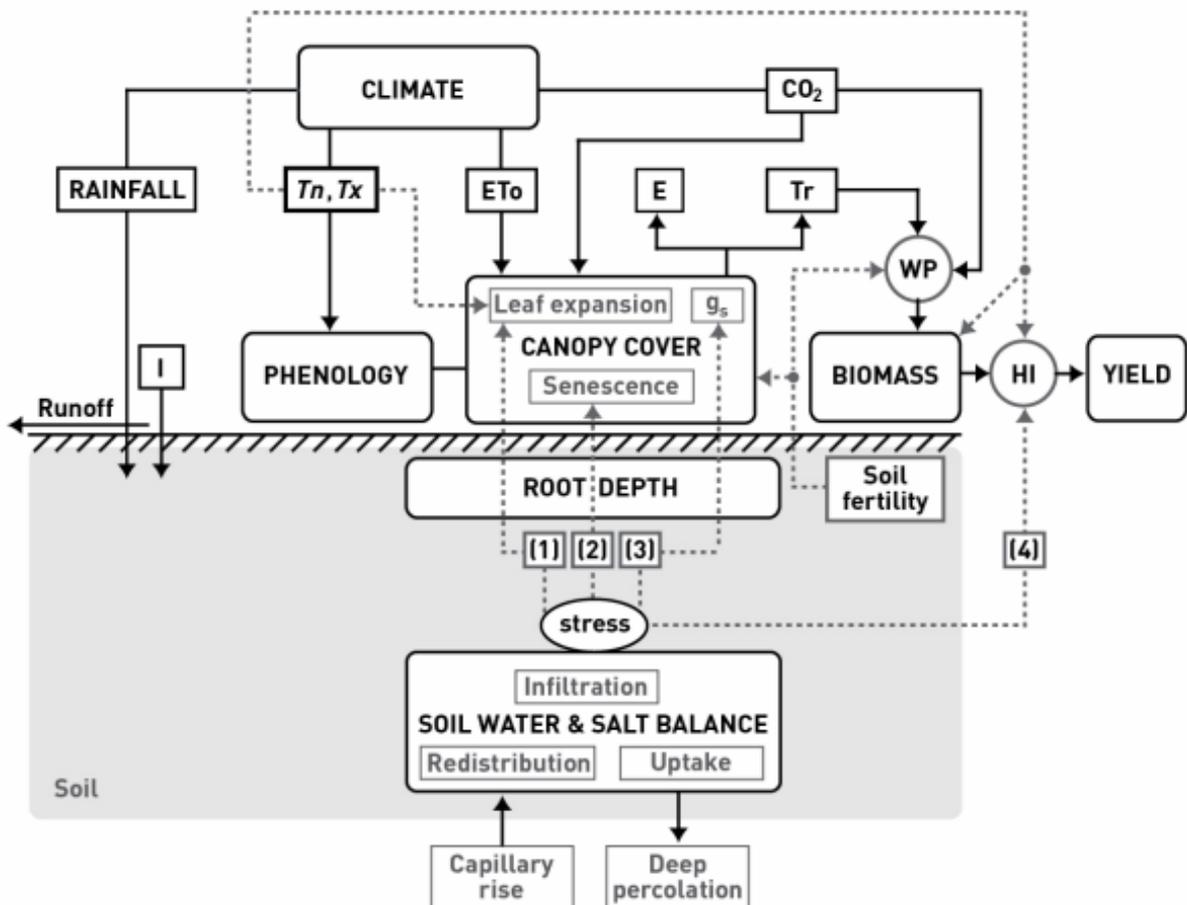


Figura 5: Fluxograma esquemático do modelo AquaCrop com indicação das principais componentes do sistema solo-planta-atmosfera.

Fonte: (RAES, et al., 2011)

Com a finalidade da simulação de produtividade final (Y) seja realizada, é preciso adicionar os dados de entrada referentes ao clima (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima), cultura (fases fenológicas em graus dias ou em dia), solo (capacidade de campo, ponto de murcha permanente, saturação e classe de textura) e práticas de manejo (uso de cobertura morta e manejo de irrigação). Além das informações fornecidas pelo modelo.

3.3.1 Componente clima

Os arquivos climáticos do AquaCrop foram gerados através da inserção dos dados diários de precipitação, temperatura mínima, temperatura máxima, evapotranspiração de referência (ET₀) e a concentração média anual de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. A ET₀ foi calculada utilizando a metodologia de Penman-Monteith FAO (ALLEN et al., 1998), conforme a Equação 6.

$$ET_{0_i} = \frac{0,4082\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Equação 6}$$

em que, a ET₀ é a evapotranspiração de referência em mm/d, o valor de 0,408 transforma a radiação líquida R_n expressa em MJ/m²/d em evaporação equivalente, expressa em mm/d, R_n é a radiação na Superfície da cultura Valor em MJ/m²/d, a temperatura média é descrita pela letra t, na altura de 2 m em °C, G é a densidade calorimétrica presente no solo expressa em MJ/m²/d, que é considerado relativamente pequeno, e é assumido como zero por 24 horas em um período de tempo, U₂ é a velocidade do vento a uma altura de 2 metros em m/s, (e_s-e_a) representa a diferença de pressão de vapor medida a uma altura de 2 m (kPa); Δ é a curva de pressão de vapor. A inclinação (kPa/°C); γ constante de umidade (kPa/°C).

3.3.2 Componente cultura

Os parâmetros referentes aos dados da cultura foram: data de semeadura, data de colheita, espaçamento ou população de plantas, fases fenológicas, tipo de cultura, fechamento do dossel, senescência, maturação, índice de colheita e tolerância ao estresse hídrico, salino e a profundidade do sistema radicular.

Inicialmente, para efetuar a inserção dos dados da cultura, no painel *Environment and Crop/Ambiente e cultura*, o usuário deve clicar em Crop e selecionar ou criar o arquivo de

cultura. Logo, é necessário especificar o nome do arquivo, tipo de cultura, método de plantio, definir o período da colheita e a duração do ciclo de crescimento. Na janela características da cultura (*Crop characteristics*), para completar o grupo de dados, foi possível inserir os parâmetros citados acima.

3.3.3 Componente solo

No que se refere ao perfil do solo, o modelo possibilita até cinco diferentes horizontes, cada um com suas características físicas. Quanto às características hidráulicas do solo, os dados necessários são: capacidade de campo (Θ_{cc}) ou limite superior de retenção de água; ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) ou limite inferior de água e a condutividade hidráulica à saturação (K_{sat}). Nos casos em que os dados não podem ser obtidos no local, os usuários do software podem usar os valores de indicação fornecidos pelo AquaCrop para várias categorias de textura do solo ou importar ou exportar dados locais de textura do solo.

3.3.4 Componente manejo

Os arquivos necessários para compor o conjunto de dados do manejo para a modelagem foram: as práticas de manejo de irrigação adotadas e as práticas que afetam a evaporação da água do solo (uso de cobertura morta).

Neste trabalho foi considerado o cultivo de soja sob condições irrigadas. Para isto, foi necessário realizar a entrada dos dados a partir do painel de manejo, clicando em Irrigação e, em seguida, em Selecionar ou Criar arquivo de irrigação. Foram inseridas informações sobre o sistema de irrigação utilizado (pivô central) e os eventos de irrigação em que ocorreram durante os ciclos da cultura da soja em cada um dos pivôs de estudo. As informações referentes aos eventos de irrigação (lâmina e a data em que esta foi aplicada) foram fornecidas pela própria fazenda SAMA, conforme o manejo de irrigação realizado na propriedade. A lâmina de irrigação aplicada pela fazenda é obtida por meio da empresa IRRIGER, que utiliza a metodologia do método da FAO modificado para obter a ET da soja.

A irrigação e o manejo de campo implementados no decorrer do experimento no campo são elementos de relevância a serem considerados no modelo AquaCrop. O manejo do campo considera opções relacionadas às práticas de superfície do campo, como cobertura morta para reduzir a evaporação do solo. Essas práticas podem influenciar a variável de

produtividade de água (WP), o desenvolvimento do crescimento do dossel e sua cobertura máxima e a taxa de decréscimo do dossel verde durante a senescência.

3.4 Calibração do modelo AquaCrop

O modelo AquaCrop foi calibrado com o objetivo de estimar o rendimento de grãos da cultura da soja e a produção de biomassa total com confiabilidade, considerando o cultivo de soja em cenários irrigados nos três pivôs de estudo, na qual no P4 e P16 ocorreu na safra de 2019/2020 e no P8 na safra 2020/2021.

Os valores exibidos no manual do modelo AquaCrop (RAES et al., 2009) foram parametrizados para uma circunstância típica de clima e solo, podendo ser divididos em variáveis conservativas e não conservativas. As variáveis conservativas não precisam de calibração, podendo ser utilizadas para qualquer área. Parâmetros não conservadores precisam ser ajustados com o intuito de aprimorar os resultados da simulação. Após adicionar os valores dos parâmetros no modelo, a estimativa de produtividade é realizada. No entanto, caso a taxa de retorno simulada não seja próxima da taxa de retorno exata, os parâmetros são alterados e calibrados repetidamente uma vez que o erro absoluto e relativo da taxa de retorno real em relação à taxa de retorno simulada seja menor.

Na etapa de calibração do modelo AquaCrop foi efetuada a comparação da produtividade de grãos e biomassa total da cultura estimadas pelo modelo com a produtividade de grãos e biomassa total da cultura da soja observadas nos três pivôs. A calibração do modelo foi realizada através de um procedimento de tentativa e erro, onde parâmetros não conservativos do modelo foram alterados, sendo estes parâmetros conhecidos e com maior probabilidade de afetar a variável de referência. Este processo foi repetido várias vezes até atingir o valor correspondente mais próximo entre o valor estimado pelo modelo e o valor observado. A aproximação entre esses dois valores visa minimizar a diferença, obtendo assim um conjunto de parâmetros (ABEDINPOUR et al., 2012). Os parâmetros conservativos e os parâmetros de calibração, e seus valores específicos, para os três pivôs, estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros conservativos e de calibração utilizados no modelo AquaCrop para a cultura da soja, considerando o Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e o Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Sigla	Descrição	Un	P4		P8		P16	
			Sim	Cal	Sim	Cal	Sim	Cal
Parâmetros conservativos								
T_{base}	Temperatura basal	°C	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
T_{upper}	Temperatura superior	°C	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0
CC_0	Cobertura do dossel em 90% de emergência	cm ²	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Z_{min}	Profundidade mínima efetiva da raiz	m	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$f_{shape, z}$	Fator de forma para o crescimento da raiz	-	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
$P_{exp, upper}$	Limite superior de esgotamento da água do solo para expansão do dossel	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
$P_{exp, lower}$	Limite inferior de esgotamento da água do solo para expansão do dossel	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{exp, w}$	Fator de forma para coeficiente de estresse hídrico para expansão do dossel	-	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
$f_{shape, sto}$	Fator de forma para coeficiente de estresse hídrico para controle estomático	-	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
$f_{shape, sen}$	Fator de forma para coeficiente de estresse hídrico para aceleração de senescência	-	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Parâmetros Calibrados								
z_{max}	Profundidade máxima efetiva da raiz	m	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5
p_{sto}	Limite de depleção da água do solo para controle estomático	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
p_{pol}	Limite de depleção da água do solo para falha de polinização	-	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
p_{sen}	Limite de depleção da água do solo para aceleração da senescência	-	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,7
$K_{cTr, x}$	Coefficiente de cultivo para transpiração em CC = 100%	-	1,2	1,2	1,1	1,1	1,2	1,2
WP*	Produtividade de água da cultura	g/m ²	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
HIo	Índice de colheita de referência	%	22,0	22,0	35,0	28,0	23,0	23,0
CCx	Máxima cobertura do dossel	%	90,0	99,0	98,0	100	90,0	96,0
CGC	Coefficiente de crescimento do dossel	%	11,3	11,9	10,5	13,6	12,4	20,9
CDC	Coefficiente de declínio do dossel	%	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

Un = Unidade; Sim = Simulado; e Cal = Calibrado.

3.5 Simulação de cenários de produção de soja

Após a calibração do modelo, foi selecionado o pivô que obteve melhor desempenho na avaliação estatística da calibração para a simulação de diversos cenários de manejo da cultura da soja, totalizando em 15 cenários: 6 níveis de lâminas de irrigação, 4 fases

fenológicas com interrupção ou manutenção da irrigação e 5 datas de semeadura. O pivô selecionado para este fim foi o P8. Para compor os 15 cenários, foram avaliadas diferentes estratégias de déficit de irrigação: níveis de lâminas de irrigação, interrupção ou manutenção da irrigação em fases fenológicas específicos da cultura; além da avaliação de diferentes datas de semeadura.

Para os cenários de diferentes níveis lâmina de irrigação foram avaliados 6 níveis de lâmina de irrigação ao longo do ciclo da cultura da soja, sendo eles: **L100: Reposição de 100% da demanda hídrica da cultura** (cenário de referência, ou seja, lâmina real de irrigação aplicado), ou seja, sem déficit hídrico; **L25: Reposição de 25% da lâmina demandada no cenário de referência**, ou seja, déficit hídrico de 75%; **L50: Reposição de 50% da lâmina demandada no cenário de referência**, ou seja, déficit hídrico de 50%; **L75: Reposição de 75% da lâmina demandada no cenário de referência**, ou seja, déficit hídrico de 25%; **L125: Reposição de 125% da lâmina demandada no cenário de referência**, ou seja, excesso hídrico de 25%; e **L150: Reposição de 150% da lâmina demandada no cenário de referência**, ou seja, excesso hídrico de 50%. Assim, de posse dos eventos de irrigação fornecidos pela própria fazenda SAMA, referentes a L100, foram calculadas as lâminas de irrigação para os cenários correspondentes aos demais níveis de lâmina de irrigação (L25, L50, L75, L125 e L150), sendo estas variações na fração aplicada no cenário de referência (L100).

Para os cenários de interrupção ou manutenção da irrigação nos estádios específicos do desenvolvimento da cultura da soja foram avaliados 4 cenários, considerando os eventos de irrigação reais. Neste caso, os cenários foram definidos da seguinte forma: **SI: Sem Interrupção da irrigação**, ou seja, a aplicação da irrigação foi mantida durante todo o ciclo da cultura, sendo este cenário considerado como de referência; **CI-V: Com Interrupção da irrigação no estágio Vegetativo**, ou seja, entre os estádios V1 e R1 (17 a 57 DAS) a irrigação será interrompida e após o estágio R1 a aplicação da irrigação foi retomada até a colheita; **CI-F: Com Interrupção da irrigação no estágio de Florescimento**, ou seja, até o estágio R1 a irrigação foi mantida, e entre os estádios R1 a R5 (58 a 72 DAS) a irrigação foi interrompida e, após o estágio R5 a aplicação da irrigação foi retomada até a colheita; **CI-E: Com Interrupção da irrigação no estágio de Enchimento de grãos**, ou seja, até o estágio R5 a irrigação foi mantida, e entre os estádios R5 e R8 (65 a 140 DAS) a irrigação foi interrompida.

Vale ressaltar que para a avaliação das diferentes estratégias de déficit de irrigação (níveis de lâminas de irrigação, e interrupção ou manutenção da irrigação em fases

fenológicas específicas da cultura), nas simulações dos cenários foram consideradas as informações calibradas correspondentes ao P8, onde a semeadura da soja ocorreu no dia 28/10/2020.

Para os cenários de diferentes datas de semeadura foram avaliadas 5 datas, com intervalos definidos de 10 dias, sendo que essas datas estão dentro da janela de zoneamento de risco climático. Neste caso, também foram utilizadas as informações clima, cultura, manejo e solo calibradas para o P8, alterando-se somente as datas de semeadura. As datas de semeaduras avaliadas foram: 08/10/2020 (DS1), 18/10/2020 (DS2), 28/10/2020 (DS3), 07/11/2020 (DS4) e 17/11/2020 (DS5). Neste caso, a data 20/10/2020 (DS3) é considerada como a data de semeadura de referência, já que foi a data utilizada pela propriedade para a semeadura da soja.

Para comparar e avaliar os resultados obtidos na simulação dos cenários de produção de soja com os valores observados em campo (condições reais da cultura), foi calculado o desvio (D%), de acordo com a Equação 7.

$$D = (E_i - M_i) \times 100 / M_i \quad \text{Equação 7}$$

em que, E_i é o valor estimado após a calibração do modelo, e M_i é o valor mensurado em campo.

3.6 Análise estatística dos dados

O desempenho do modelo AquaCrop na estimativa da produtividade de grãos e da biomassa total da cultura da soja após a calibração, foi avaliado através dos seguintes indicadores estatísticos: erro médio absoluto (EMA), índice de concordância de Willmontt's (d), raiz quadrada do erro médio (RMSE), a eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinação (R^2) e o índice de confiança (c).

O Erro médio absoluto (EMA), calcula a magnitude da média ponderada dos erros absolutos. Para Willmontt's e Matsuura (2005), o EMA se trata de uma medida natural que possui uma melhor precisão em relação á da magnitude média do erro. O EMA foi calculado por meio da Equação 8.

$$EMA = \frac{\sum |E_i - M_i|}{N} \quad \text{Equação 8}$$

O Índice de concordância “d”, proposto por Willmott’s (1985), mede a distância em que os pontos mensurados versus simulados estão afastados da reta 1:1. Para o coeficiente de Willmott, valores próximos a 1 indicam resultados aceitáveis. O d foi calculado por meio da Equação 9.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (E_i - M_i)^2}{\sum (|E_i - M| + |M_i - M|)^2} \right] \quad \text{Equação 9}$$

A Raiz quadrada do erro médio (RMSE) calcula a magnitude média do erro de estimativa, concedendo o grau de espalhamento obtido na correlação entre o valor estimado e o valor observado. Uma das vantagens do RMSE é que essa diferença se dá na mesma unidade de variáveis de observação e simulação (NYAKUDYA e STROOSNIJDER, 2014). Para RMSE, valores abaixo de 10%, entre 10 e 20%, entre 20 e 30% e > 30%, equivalem a resultados de estimativa perfeitos, bons, aceitáveis e ruins. O RMSE foi calculado por meio da Equação 10.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (E_i - M_i)^2}{N}} \quad \text{Equação 10}$$

A eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), proposto por Nash e Sutcliffe (1970), é uma estatística normalizada usada para determinar a relevância relativa da variância residual em verificação com as mudanças observadas nos dados. O NSE representa o grau de ajuste entre a combinação de dados observados e dados simulados e a linha 1:1, indicando a robustez do modelo. Valores de NSE entre 0 e 1 são considerados níveis de desempenho aceitáveis, enquanto um valor <0 indica que a média observada é um prognóstico melhor em comparação ao resultado simulado, apontando performance inaceitável (MORIASI et al., 2007). O NSE foi calculado por meio da Equação 11.

$$\text{NSE} = 1 - \left[\frac{\sum (M_i - E_i)^2}{\sum (M_i - M)^2} \right] \quad \text{Equação 11}$$

O Coeficiente de determinação (R^2) é o valor quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, que descreve a variância entre os dados medidos e os dados estimados do modelo e indica a precisão do modelo (FIELD, 2005). O valor de R^2 varia de 0 a 1. Quanto mais

próximo o valor estiver de 1, melhor será o ajuste. Normalmente, um valor maior que 0,5 é considerado aceitável. Um ponto negativo do R^2 é que ele calcula apenas a dispersão, assim, um modelo que superestimar (ou subestimar) o valor observado pode apresentar um bom valor para R^2 . O R^2 foi calculado por meio da Equação 12.

$$R^2 = \frac{[\sum (E_i - E)(M_i - M)]^2}{(\sum (E_i - E)^2 (\sum M_i - M)^2)} \quad \text{Equação 12}$$

Os cálculos para os cinco indicadores de adequação foram efetuados com base nos valores mensurados (M_i) e estimados (E_i), e suas respectivas médias M e E .

O desempenho do AquaCrop foi avaliado ainda através do índice de concordância (c), correspondente à multiplicação do índice de correlação (r) pelo coeficiente de exatidão (d), conforme a Equação 14, descrita por Camargo e Sentelhas (1997).

$$c = r * d \quad \text{Equação 13}$$

A classificação do índice de concordância (c) seguiu os critérios de interpretação apresentados na Tabela 5 (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Tabela 5: Critério de interpretação do desempenho do método de estimativa, pelo índice de concordância (c).

Índice de concordância (c)	Desempenho
> 0,86	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização climática para os períodos de simulação

Na Figura 6 estão apresentadas as variáveis climáticas diárias observadas durante os ciclos da cultura da soja cultivada no P4. A aquisição dos dados foi realizada na safra de 2019/2020, durante o período de 31/10/2019 a 20/03/2020, totalizando em 142 dias.

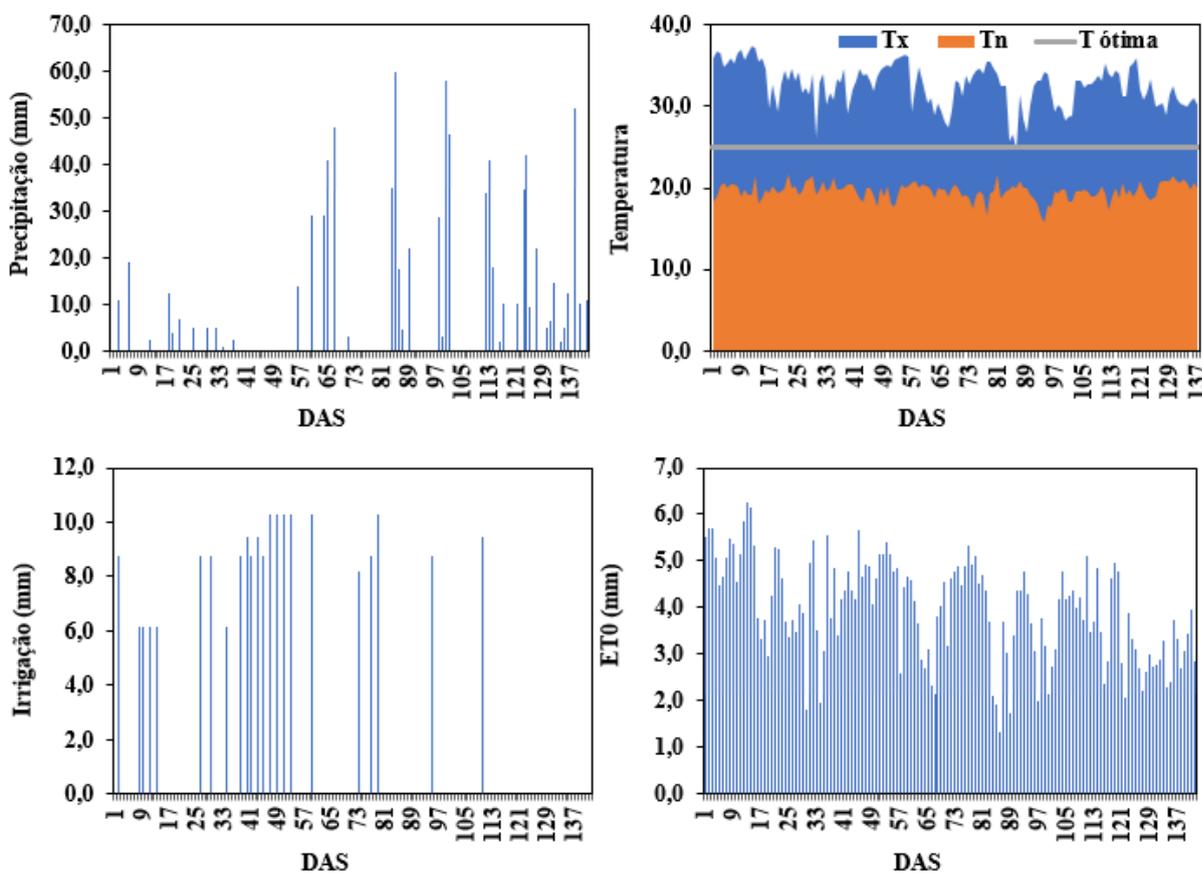


Figura 6: Dados climáticos diários observados durante o ciclo da cultura da soja no Pivô 4 (P4) da Fazenda SAMA.

Os totais precipitados durante os ciclos da cultura da soja no P4 foram iguais a 855,25 mm, observa-se a ocorrência de veranicos, com períodos sem chuva variando de 10 a 18 dias. Os maiores volumes diários de precipitação ocorreram aos 85 DAS sendo observada uma precipitação de 60 mm. A ET0 média observada no P4 foi igual a 3,96 mm. O maior valor diário foi observado no mês de dezembro, sendo o valor igual a 6,26 mm (13 DAS). A ET0 acumulada ao longo do ciclo de cultivo da soja foi de 562,4 mm. A lâmina de irrigação total aplicada no P4 foi de 199,3 mm, já o valor da lâmina média foi de 8,66 mm. As temperaturas

do ar variaram entre máximas de 24,57°C e 37,72°C, mínimas de 15,73°C e 21,79 e média de 27,77°C. As maiores temperaturas foram observadas entre os meses de novembro e dezembro.

Na Figura 7 estão apresentadas as variáveis climáticas diárias observadas durante os ciclos da cultura da soja cultivada no P8. A coleta dos dados ocorreu na safra de 2020/2021, compreendendo o período de 28/10/2020 a 16/03/2021, totalizando em 140 dias.

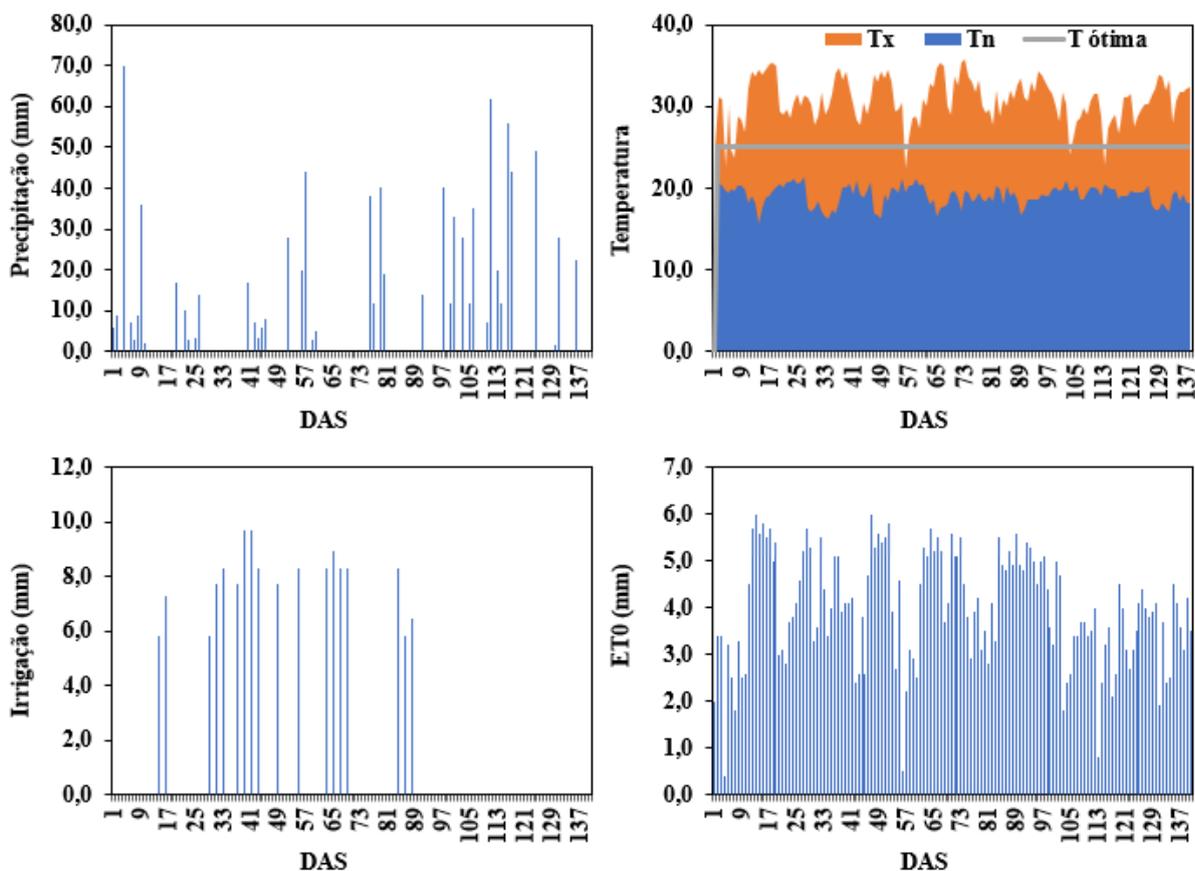


Figura 7: Dados climáticos diários observados durante o ciclo da cultura da soja no Pivô 8 (P8) da Fazenda SAMA.

Os totais precipitados durante os ciclos da cultura da soja no P8 foram iguais a 916 mm, observa-se a ocorrência de veranicos, durante o ciclo da cultura, com períodos sem chuva variando de 10 a 15 dias. Onde os maiores volumes diários de precipitação ocorreram aos 4 DAS sendo observada uma precipitação de 70 mm. A ET0 média observada no P8 foi igual a 3,98 mm, sendo que o maior valor diário foi observado no mês de dezembro, no qual o valor foi igual a 6,00 mm (13 DAS). A ET0 acumulada ao longo do ciclo de cultivo da soja no respectivo pivô foi de 557,20 mm. A lâmina de irrigação total aplicada no P8 foi de 140,80 mm, já o valor da lâmina média foi de 7,82 mm. As temperaturas do ar registradas no P8 durante o ciclo de cultivo da soja variaram entre máximas de 22,60°C e 35,74°C, mínimas de

15,61 °C e 21,25 °C e média de 26,35°C. As maiores temperaturas foram observadas entre os meses de dezembro e janeiro no decorrer do ciclo de cultivo.

Na Figura 8, estão apresentadas as variáveis climáticas diárias observadas durante os ciclos da cultura da soja cultivada no P16. A coleta dos dados ocorreu na safra de 2019/2020, onde o ciclo da cultura foi de 07/11/2019 a 21/03/2020, totalizando em 136 dias.

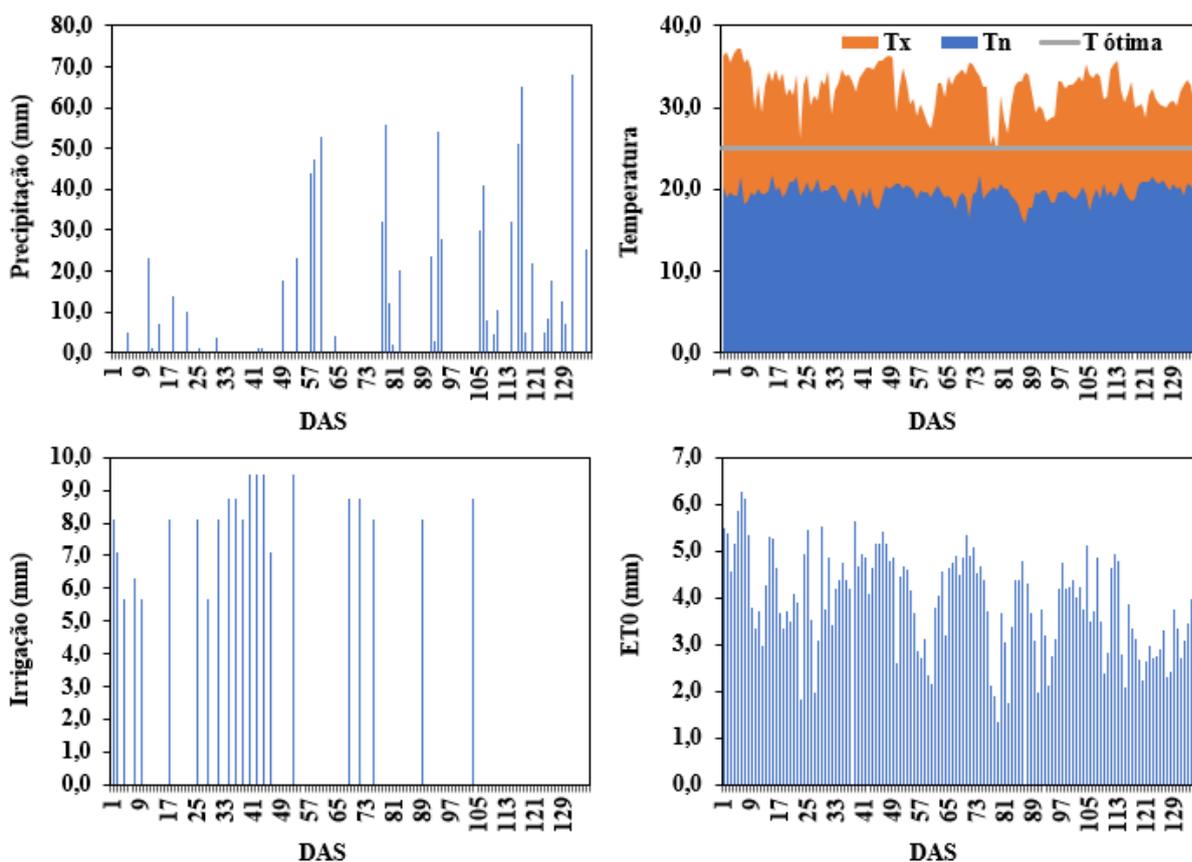


Figura 8: Dados climáticos diários observados durante o ciclo da cultura da soja no Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Os totais precipitados durante o ciclo da cultura da soja no P16 foram iguais a 899,75 mm. Observa-se a ocorrência de veranicos, durante o ciclo da cultura, com períodos sem chuva variando de 10 a 12 dias. Os maiores volumes diários de precipitação ocorreram aos 131 DAS sendo observada uma precipitação de 68 mm. A ET0 média observada no P16 foi igual a 3,89 mm, onde o maior valor diário foi observado no mês de dezembro, sendo o valor igual a 6,26 mm (6 DAS). A ET0 acumulada ao longo do ciclo de cultivo da soja foi de 557,20 mm. A lâmina de irrigação total aplicada no P16 foi de 175,75 mm, já o valor da lâmina média foi de 8,36 mm. As temperaturas do ar registradas no P16 durante o ciclo de cultivo da soja variaram entre máximas de 24°C e 37,2°C, mínimas de 15,73 °C e 21,79 °C e

média de 27,64°C. As maiores temperaturas foram observadas entre os meses de novembro e dezembro ao longo do ciclo de cultivo.

As condições térmicas observadas e utilizadas para calibração do modelo AquaCrop estiveram na faixa classificada como ideal para o cultivo da soja nos dois anos, visto que, a soja se adapta melhor às regiões onde as temperaturas oscilam entre 20 °C e 30 °C, sendo a temperatura ideal para seu desenvolvimento em torno de 30 °C. Ferreira et al. (2007) enfatiza que a variação da temperatura média de 1 °C já é, consideravelmente, capaz de modificar o índice de colheita da soja (HI) em qualquer estágio fenológico, que, por sua vez, influenciam diretamente no rendimento da cultura.

4.2 Calibração do modelo AquaCrop para a cultura da soja

A calibração do modelo AquaCrop foi realizada utilizando dados de clima, solo, cultura, manejo e irrigação coletados na Fazenda SAMA considerando o cultivo da cultura da soja em três pivôs, para avaliar o comportamento dos dados observados e simulados, após a calibração, para as seguintes variáveis: porcentagem de cobertura do dossel (CC%), evolução da biomassa, coeficiente da cultura (Kc), evapotranspiração da cultura (ETc), biomassa total e produtividade de grãos.

Na Figura 9 apresenta-se o comportamento da cobertura do dossel da cultura da soja para os três pivôs de estudo.

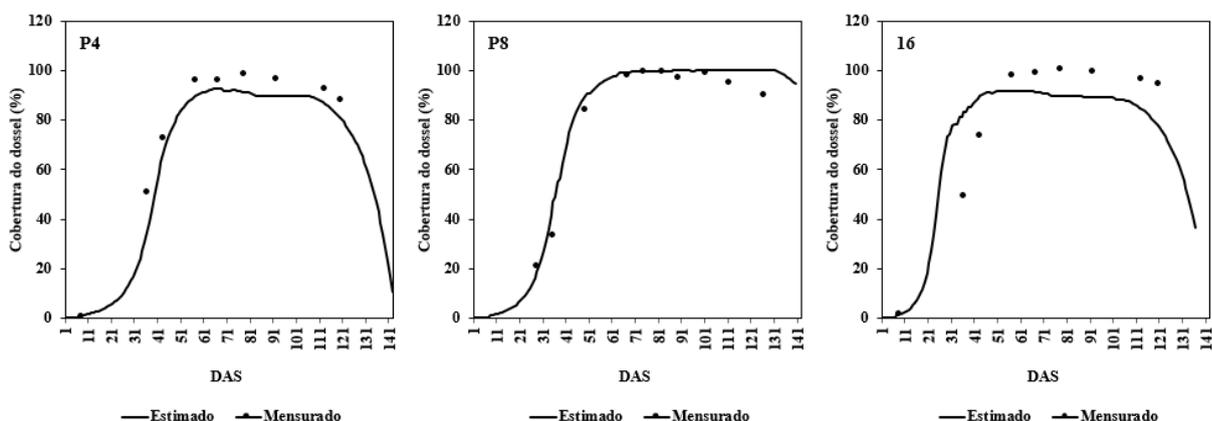


Figura 9: Comportamento da cobertura de dossel (CC%) da cultura da soja estimado pelo modelo AquaCrop após a calibração, e mensurado considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Observa-se que o modelo tende a subestimar a CC% a partir da fase de desenvolvimento da cultura até a fase final do ciclo, considerando o P4 e P16. Já no P8, os

resultados mostram que nos estágios finais o comportamento do CC% é superestimado, contudo, a curva se aproxima dos valores observados, indicando que neste pivô o modelo estimou o CC% com melhor exatidão.

O modelo AquaCrop apresentou resultados satisfatórios na estimativa do comportamento da cobertura do dossel, para os três pivôs. Considerando o P4, P8 e P16, respectivamente, os valores de coeficiente de correlação de Pearson (r), dados pelo próprio modelo AquaCrop, foram iguais a 0,97, 0,99 e 0,89, obtendo um valor médio de r igual a 0,95. Nesta mesma ordem (P4, P8 e P16), os valores de RMSE foram iguais a 8,6, 6,0 e 15,5%, os valores de NSE foram iguais a 0,92, 0,95 e 0,78, e os valores de índice de Willmott (d) foram iguais a 0,98, 0,99 e 0,94. Os valores médios de RMSE, NSE e d foram iguais a 10,03%, 0,88 e 0,97, respectivamente.

O comportamento da evolução da biomassa, estimada e mensurada, ao longo dos ciclos da cultura da soja nos três pivôs está apresentado na Figura 10.

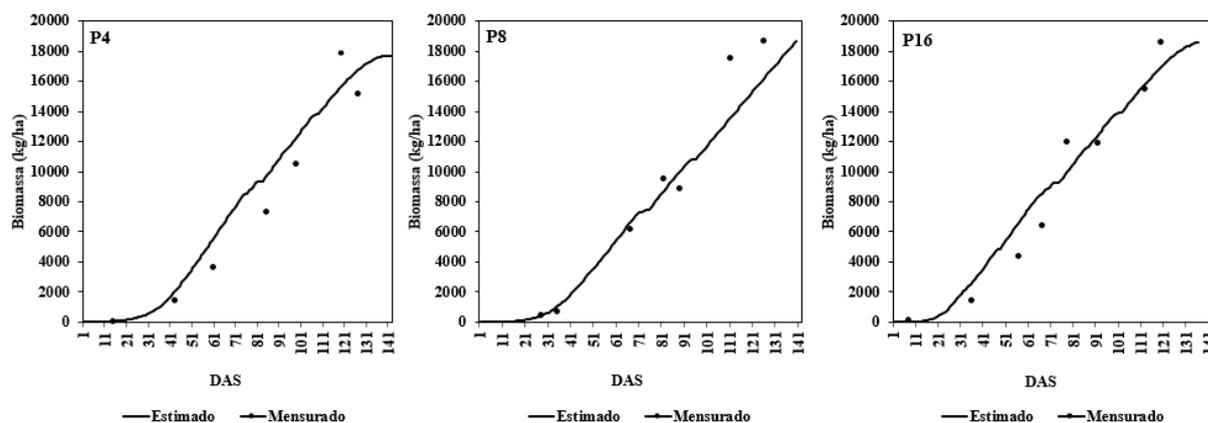


Figura 10: Comportamento da evolução da biomassa (kg/ha) da cultura da soja estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e mensurada considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Observa-se que, no P8, durante a fase final do ciclo da cultura (111 e 126 DAS), houve um aumento na estimativa da biomassa, ou seja, o modelo superestimou a produção de biomassa, ultrapassando o ganho de biomassa mensurado. Mas, ainda assim, no P8 em comparação com o P4 e P16, foram observados que ao longo dos ciclos das culturas o comportamento a biomassa estimada pelo modelo até os 89 DAS permaneceu próximo aos valores de biomassa mensurada. No P4 e no P16, por volta dos 61 DAS, observou-se que o AquaCrop superestimou o comportamento da biomassa, sendo que, no P4, este comportamento se estendeu até a fase de maturação, e, no P16, ao se aproximar da senescência obteve resultados satisfatórios. Para os três pivôs, o modelo AquaCrop apresentou

resultados satisfatórios na estima da biomassa, com valores de R^2 iguais a 1,0, 1,0 e 1,0 considerando o P4, P8 e P16, respectivamente.

O modelo AquaCrop também apresentou resultados satisfatórios na estimativa do comportamento da evolução da biomassa ao longo do ciclo da cultura da soja, para os três pivôs. Considerando o P4, P8 e P16, respectivamente, os valores de coeficiente de correlação de Pearson (r), dados pelo próprio modelo AquaCrop, foram iguais a 0,97, 0,98 e 0,98, obtendo um valor médio de r igual a 0,98. Nesta mesma ordem (P4, P8 e P16), os valores de RMSE foram iguais a 1,5, 1,8 e 1,6 kg/ha, os valores de NSE foram iguais a 0,95, 0,93 e 0,94, e os valores de índice de Willmott (d) foram iguais a 0,99, 0,98 e 0,98. Os valores médios de RMSE, NSE e d foram iguais a 1,63 kg/ha, 0,94 e 0,98, respectivamente.

Na Figura 11 apresenta-se o comportamento do coeficiente de cultivo (K_c) da cultura da soja estimado pelo modelo AquaCrop, após a calibração, e utilizado pela Fazenda SAMA (FAO) para o manejo de irrigação, considerando os ciclos de cultivo nos três pivôs.

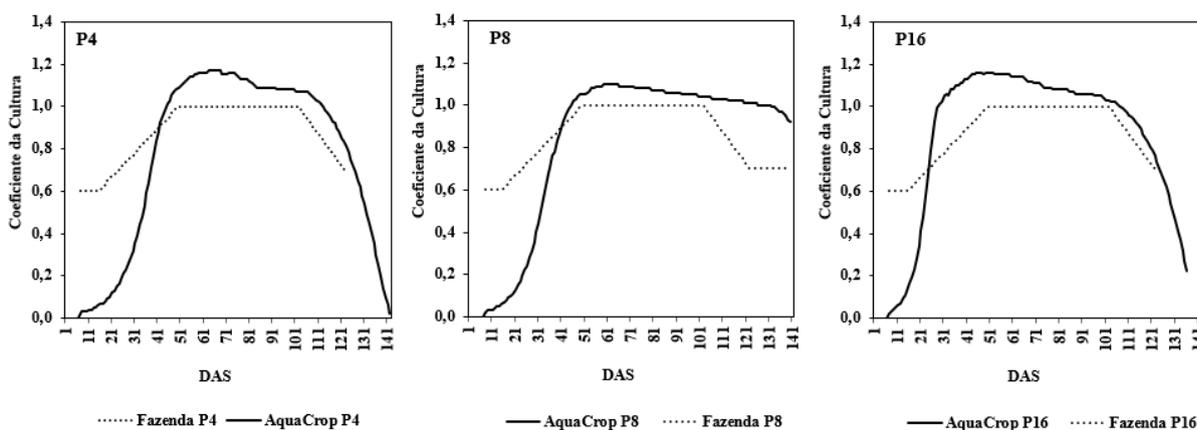


Figura 11: Comportamento do coeficiente da cultura (K_c) da cultura da soja estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e utilizado pela Fazenda SAMA (FAO) no manejo de irrigação, considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Observa-se que há uma certa semelhança no comportamento do K_c , entre o comportamento do K_c estimado pelo modelo e o utilizado pela Fazenda, principalmente no estágio reprodutivo da cultura. Analisando a Figura 11, verifica-se que nos estádios iniciais o modelo subestimou os valores do K_c nos três pivôs, e após os 41 DAS o modelo superestimou. No entanto, observa-se que nos estádios iniciais e finais da cultura, o comportamento do K_c possui uma maior diferença, isto pode estar associado a influência da umidade contínua na superfície do solo, devido ao solo estar pouco coberto ou totalmente descoberto. De acordo com Pierdoná (2016), o tipo de preparo do solo pode influenciar

diretamente sobre os valores do coeficiente de cultivo no início do ciclo, geralmente, o sistema plantio direto feito com restos culturais e palhada, como realizado na propriedade, reduz a perda de água do solo, de forma que minimize os valores do Kc.

A evapotranspiração é um dos parâmetros mais importantes da composição do balanço hídrico e ciclo hidrológico em ambientes agrícolas, dessa maneira, o entendimento preciso desse fator propicia uma apropriada recomposição hídrica precisa às culturas (CARVALHO et al., 2015). Na Figura 12 apresenta-se o comportamento da evapotranspiração da cultura da soja (ETc) estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e utilizado pela Fazenda SAMA para o manejo de irrigação, considerando os ciclos de cultivo nos três pivôs.

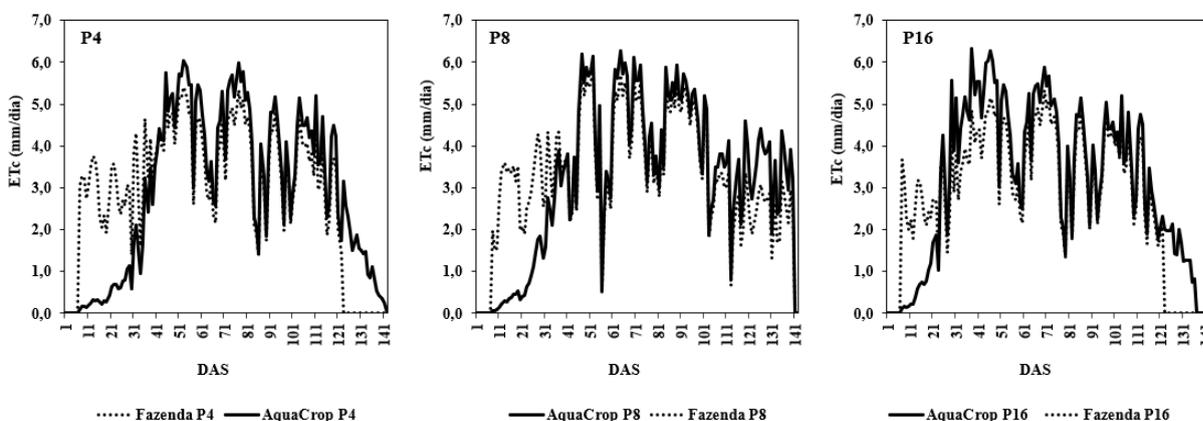


Figura 12: Comportamento da evapotranspiração da cultura da soja (ETc) estimada pelo modelo AquaCrop após a calibração, e utilizada pela Fazenda SAMA para o manejo de irrigação, considerando os ciclos de cultivo no Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8) e Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

A ETc média observada no P4 foi igual a 2,91 mm, no P8, igual a 3,29 mm, e, no P16, igual a 2,82 mm. Observa-se que os maiores valores de ETc ocorreram ao longo do ciclo de cultivo do P8. Nos três pivôs, os maiores valores diários foram observados no mês de dezembro, sendo os valores no P4, P8 e P16 iguais a 5,41 mm (54 DAS), 5,81 mm (52 DAS) e 5,13 mm (51 DAS), respectivamente. A ETc acumulada ao longo dos ciclos de cultivo da soja foi de 562,4 mm, no P4, de 529,9, no P16, e de 557,20 mm, no P8.

Analisando a Figura 12, observa-se ainda, que, no P4 e P8, a ETc estimada pelo AquaCrop em relação aos valores utilizados pela Fazenda foi menor. No P16 ocorreu o comportamento inverso, os valores de ETc estimada pelo AquaCrop foram maiores, principalmente entre os 30 e 50 DAS. O que pode ter influenciado este comportamento, no P16, foi o fato de a semeadura de soja ter ocorrido mais tardia (07/11/2019) que nos outros

dois pivôs, onde as fases iniciais do ciclo da cultura coincidiu com o período em que os valores de temperatura foram mais elevados (novembro e dezembro), que, por sua vez, favorece o aumento da evaporação do solo e, conseqüentemente, o aumento da evapotranspiração. Nota-se ainda, que o modelo subestimou o comportamento da evapotranspiração na fase inicial do ciclo da cultura da soja nos três pivôs, e isso ocorreu devido ao comportamento do coeficiente da cultura, onde, nos estádios iniciais o modelo subestimou os valores do Kc nos três pivôs, já que nesta fase, onde o solo está praticamente descoberto pela cultura, o modelo considera a fração de evaporação de água do solo para a atmosfera. Outro fato que contribuiu para haver esta diferença entre os valores de ETc entre estimada pelo modelo e a ETc utilizada pela Fazenda, foi o fato de a Fazenda utilizar um valor único de Kc para cada fase de desenvolvimento da cultura enquanto o modelo simula um Kc diário. Este fato é ainda mais expressivo nas fases iniciais da cultura, uma vez que, com o desenvolvimento da cultura, o Kc aumenta progressivamente até se estabilizar na reprodutiva.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de produtividade em grãos e biomassa total estimados pelo AquaCrop após a calibração, e mensurados em campo, considerando o P4, P8 e P16.

Tabela 6: Valores de produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimados pelo AquaCrop após a calibração, e mensurados em campo, considerando o Pivô 4 (P4), Pivô 8 (P8), Pivô 16 (P16) da Fazenda SAMA.

Pivô	Produtividade (kg/ha)		Biomassa (kg/ha)	
	Mensurado	Calibrado	Mensurado	Calibrado
P4	3.885	3.815	17.790	17.729
P8	5.420	5.404	18.670	18.657
P16	4.331	4.307	18.550	18.602
Média	4.545	4.509	18.337	18.329

Verificou-se que no P8, a produtividade em grãos mensurada foi de 5.420 kg/ha e a calibrada foi de 5.404 kg/ha, ocorrendo uma diferença de 16 kg/ha. Já para biomassa, o valor mensurado foi de 18.670 kg/ha, e o calibrado de 18.657 kg/ha, havendo um decréscimo de 13 kg/ha. Por tanto, verifica-se que houve uma diferença de 0,295% na estimativa da produtividade de grãos, e -0,070% referente a biomassa acima do solo.

No P4, os valores de produtividades mensurados em campo e calibrados no modelo AquaCrop foram 3.885 kg/ha e 3.815 kg/ha, respectivamente, em que houve uma diferença de 70 kg/ha, isto é, 1,8%. Para biomassa, o valor mensurado foi de 17.790 kg/ha, e o calibrado de

17.729 kg/ha, havendo um decréscimo de 61 kg/ha. Por tanto, verifica-se que houve uma diferença de -0,34% % na estimativa da biomassa acima do solo.

Verificou-se que no P16, alcançou valores de 4.331 kg/ha para a produtividade em grãos mensurada, e 4.307 kg/ha para a produtividade calibrada. Onde, ocorreu uma diferença entre calibrado e mensurado de 24 kg/ha, com um percentual de 0,55% de diferença. Para biomassa, o valor mensurado foi de 18.550 kg/ha, e o calibrado de 18.602 kg/ha, havendo um aumento de 52 kg/ha. Por tanto, verifica-se que houve uma diferença de 0,28% na estimativa da produtividade da biomassa acima do solo.

4.3 Simulação de cenários de produção de soja

Após a calibração do modelo para os três pivôs de estudo, foi selecionado o pivô que obteve melhor desempenho na avaliação estatística da calibração para a simulação de diversos cenários de produção da cultura da soja, sendo, neste caso, selecionado o P8 para este fim.

4.3.1 Diferentes níveis de lâminas de irrigação

Na Tabela 7 estão apresentados os valores de produtividade em grãos e biomassa total para os seis cenários de diferentes níveis de lâminas de irrigação ao longo do ciclo da cultura da soja.

Tabela 7. Produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimadas pelo modelo AquaCrop calibrado, considerando diferentes níveis de lâminas de irrigação.

Níveis de Irrigação	Produtividade		Biomassa	
	Estimado (Kg/ha)	D%	Estimado (Kg/ha)	D%
L25	4.758	-12,214	16.154	-13,476
L50	5.194	-4,170	16.976	-9,073
L75	5.506	1,587	17.779	-4,772
L100	5.404	-0,295	18.657	-0,070
L125	5.446	0,480	19.123	2,426
L150	5.551	2,417	19.581	4,879

Observa-se na Tabela 7, que ao aplicar uma lâmina de 25% (L25) a produtividade da cultura foi igual a 4.758 kg/ha, e, a biomassa, igual a 16.154 kg/ha. Neste caso, houve uma

redução na produtividade da cultura de 646 Kg/ha, e, na biomassa, uma redução de 2.504 Kg/ha, comparado a aplicação de 100% da lâmina de irrigação (L100), correspondente ao modelo calibrado para as condições de produção do P8. Comparando o cenário L25 com os resultados mensurados em campo, obtiveram-se valores de D% igual a -12,21, para produtividade, e, igual a -13,48, para biomassa. Este valor de D% significa que houve uma queda de 12,21% e 13,48% na produtividade e na biomassa da soja, respectivamente, em relação a produtividade mensurada em campo, que, por sua vez, corresponde a produtividade obtida diretamente em campo nas condições de produção do P8. Conforme BATTISTI et al. (2018), as práticas de manejo de irrigação adotadas em campo devem ser realizadas de forma correta, uma vez que a utilização inadequada da água, agregado com a carência de conhecimento da relação solo-planta-atmosfera, se torna um dos principais motivos do insucesso em grande parte das lavouras, ocasionando em quebra de produtividade.

No cenário L50, onde foi utilizado 50% da lâmina de irrigação de referência, obteve-se uma produtividade igual a 5.124 kg/ha, e, biomassa igual a 16.976 kg/ha. Neste caso, a diferença de produtividade, em relação a L100, foi de 204 Kg/ha. Comparado com o cenário L25, partiu-se de uma queda de -12,21% para - 4,17%, ambos em relação ao resultado mensurado em campo. Para o mesmo cenário (L50), a diferença no resultado da biomassa, em relação a L100, foi de 1.681 Kg/ha. Neste caso, o valor de D% comparado a biomassa mensurada em campo foi igual a -9,073.

Em contrapartida, no cenário L75, obteve-se uma produtividade igual a 5.506 kg/ha, e, biomassa igual a 17.779 kg/ha. Neste caso, a produtividade em grãos superou o resultado observado com o uso da L100 em 102 Kg/ha. O valor de D% comparado a produtividade mensurada em campo foi igual a 1,587%. Isso pode ter ocorrido, devido a ocorrência de muitos eventos de precipitação em quantidades suficientes a suprir a demanda da cultura, com isso, a irrigação não foi um fator decisivo quando aplicou-se 75% da lâmina de irrigação de referência. Ou seja, uma redução de 25% na lâmina levou a uma produtividade de 1,5% comparado a lâmina 100%. Já para a biomassa, observou-se uma redução em relação a L100, onde a diferença foi de 878 Kg/ha. O valor de D% comparado a biomassa mensurada em campo foi igual a -4,77%.

Nos cenários em que foram aplicadas lâminas de irrigação excedentes (L125 e L150), observou-se que a produtividade e a biomassa obtidas foram superiores aquelas obtidas com a L100 e dos mensurados em campo, obtendo valores de D% positivos. No cenário L125, obteve-se uma produtividade igual a 5.446 kg/ha, e, biomassa igual a 19.123 kg/ha. Neste caso, as diferenças em relação a L100, para produtividade, foi igual a 42 Kg/ha, e, para

biomassa, igual a 466 Kg/ha. Comparado aos resultados mensurados, os valores de D% com a aplicação de L125 foram iguais a 0,480% e 2,426%, para produtividade em grão e biomassa, respectivamente.

Os melhores resultados obtidos na simulação dos cenários de níveis de lâmina de irrigação, em termos de produção, foram obtidos com o uso da L150, cuja a produtividade foi igual a 5.551 kg/ha, e, a biomassa igual a 19.581 kg/ha. Neste caso, as diferenças em relação a L100, para produtividade, foi igual a 147 Kg/ha, e, para biomassa, igual a 924 Kg/ha. Comparado aos resultados mensurados, os valores de D% com a aplicação de L150 foram iguais a 2,42% e 4,88%, para produtividade em grão e biomassa, respectivamente. Embora tenha se obtido as maiores produtividades com a aplicação da L150, em termos de eficiência de uso da água há uma redução, já que foi preciso aumentar 50% na lâmina de irrigação para aumentar a produtividade em 2,42%, e a biomassa em 4,88%.

4.3.2 Déficit hídrico em fases fenológicas específicas

Na Tabela 8 estão apresentados os valores de produtividade em grãos e biomassa total para os quatro cenários de aplicação de déficit hídrico em fases fenológicas específicas ao longo do ciclo da cultura da soja.

Tabela 8. Produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimadas pelo modelo AquaCrop calibrado, considerando a influência de déficit hídrico em fases fenológicas específicas.

Déficit em fases	Produtividade		Biomassa	
	Estimado (Kg/ha)	D%	Estimado (Kg/ha)	D%
Vegetativa (CI-V)	5.199	-4,077	17.398	-6,813
Florescimento (CI-F)	4.954	-8,598	17.525	-6,133
Enchimento de Grãos (CI-E)	4.815	-11,162	17.158	-8,099
Sem interrupção da irrigação	5.404	-0,295	18.657	-0,070

Analisando a Tabela 8, observa-se que ao interromper a irrigação na fase vegetativa da cultura da soja (CI-V) a produtividade da cultura foi igual a 5.199 kg/ha, e, a biomassa, igual a 17.398 kg/ha. Houve uma redução de 205 Kg/ha na produtividade em grãos comparado com o cenário de referência (SI), onde a irrigação foi mantida durante todo o ciclo da cultura. Neste caso, o cenário de referência correspondente ao modelo calibrado para as condições de produção do P8. No cenário CI-V, obteve-se um valor de D% igual a -4,077. Isto significa que houve uma queda de 4,077% na produtividade da soja em relação a produtividade

mensurada em campo, que, por sua vez, corresponde a produtividade obtida diretamente em campo nas condições de produção do P8. Segundo Nunes et al. (2016), em estudos realizados com a cultura da soja, no qual foi aplicado lâmina de irrigação deficitária na fase vegetativa, evidenciou-se que esse cenário proporcionou ótimas características agronômicas e favoreceu para ampliar o rendimento produtivo das variedades de soja analisadas. Em relação ao acúmulo de biomassa, resultou em um decréscimo igual a 1.259 Kg/ha em relação ao cenário SI. Na comparação com a biomassa mensurada em campo, obteve-se um D% de -6,813%.

No que se refere à interrupção da irrigação na fase do florescimento (cenário CI-F), a produtividade da cultura foi igual a 4.954 kg/ha, e, a biomassa, igual a 17.525 kg/ha. Em comparação com o cenário SI, houve uma redução de 450 Kg/ha na produtividade, e de 1.132 Kg/ha na biomassa. Na comparação entre os resultados mensurados e o cenário CI-F, verificou-se decréscimo iguais a 8,598% e 6,133%, para produtividade em grão e biomassa, respectivamente. No cenário CI-F observou-se maior impacto na produtividade de grão de que no cenário CI-V. No entanto, no acúmulo de biomassa o impacto foi menor que no cenário CI-V. Conforme enfatizado por SILVA (2013), o planejamento de irrigação feito de forma errônea, associado ao déficit hídrico ao longo do ciclo da cultura, resultam em desordem funcional da planta, substancialmente na fase do florescimento, afetando significativamente a capacidade de desenvolvimento das vagens.

Em relação a interrupção da irrigação na fase de enchimento de grãos (cenário CI-E), a produtividade da cultura foi igual a 4.815 kg/ha, e, a biomassa, igual a 17.158 kg/ha. Em comparação com o cenário SI, houve uma redução de 589 Kg/ha na produtividade, e de 1.489 Kg/ha na biomassa. Na comparação entre os resultados mensurados e o cenário CI-E, verificou-se decréscimo iguais a 11,162% e 8,099%, para produtividade em grão e biomassa, respectivamente. No cenário CI-E observou-se maior impacto na produtividade de grão e na biomassa de que no cenário CI-V e CI-F. Nota-se que esse cenário, comparado com os demais, é o mais propício a ocorrência da quebra de produtividade, visto que o desenvolvimento de todas estruturas da planta pode ser afetado, já que a fase de enchimento de grãos é a fase que possui maior demanda por água. Dessa forma, a limitação da água expressiva no período do enchimento de grãos, tem potencial para acarretar em modificações fisiológicas no crescimento da planta, como enrolamento das folhas e fechamento de estômatos, o efeito disso se dá pela queda antecipada de flores e folhas, abortamento das vagens, ocasionando em decréscimo da produção de grãos (MAPA, 2021).

4.3.3 Datas de semeadura

Na Tabela 9 estão apresentados os valores de produtividade em grãos e biomassa total considerando as cinco datas de semeadura da cultura da soja.

Observa-se, na Tabela 9, que ao se utilizar a DS1 (08/10/2020) a produtividade da cultura foi igual a 5.155 kg/ha, e, a biomassa, igual a 16.934 kg/ha. Em comparação com o cenário de referência (DS3), houve uma queda de 249 Kg/ha na produtividade, e de 1.723 Kg/ha na biomassa. Neste caso, o cenário de referência correspondente ao modelo calibrado para as condições de produção do P8 em que a semeadura ocorreu no dia 28/10/2020 (DS3). Na comparação entre os resultados mensurados e o cenário DS1, verificou-se decréscimo iguais a 4,889% e 9,298%, para produtividade em grãos e biomassa, respectivamente. O cenário DS1 representa uma semeadura antecipada da cultura da soja, observa-se que os valores produtividade e biomassa obtidos nesse cenário são maiores somente que o cenário DS5, indicando que a antecipação da semeadura pode impactar na produtividade da soja, considerando as condições avaliadas.

Tabela 9. Produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja estimadas pelo modelo AquaCrop calibrado, considerando cinco datas de semeadura.

Datas de Semeadura	Produtividade		Biomassa	
	Estimado (Kg/ha)	D%	Estimado (Kg/ha)	D%
DS1 08/10/2020	5.155	-4,889	16.934	-9,298
DS2 18/10/2020	5.382	-0,701	18.869	1,066
DS3 28/10/2020	5.404	-0,295	18.657	-0,070
DS4 07/11/2020	5.277	-2,638	17.214	-7,799
DS5 17/11/2020	5.125	-5,443	16.826	-9,877

No cenário DS2, onde a semeadura foi realizada em 18/10/2020, foram alcançados valores de produtividade em grãos e biomassa mais próximos daqueles obtidos na data de semeadura de referência (DS3). Na DS2, a produtividade da cultura foi igual a 5.382 kg/ha, e, a biomassa, igual a 18.869 kg/ha. Em comparação com o cenário DS3, houve um declínio de 22 Kg/ha na produtividade, e um acréscimo de 212 Kg/ha na biomassa. Na comparação entre os resultados mensurados e o cenário DS2, verificou-se declínio igual a 0,701% na produtividade em grãos, e, um acréscimo de 1,066% na biomassa.

No cenário DS4 (07/11/2020), a produtividade da cultura foi igual a 5.277 kg/ha, e, a biomassa, igual a 17.214 kg/ha. Em comparação com o cenário DS3, houve um declínio de

127 Kg/ha na produtividade, e de 1.443 Kg/ha na biomassa. Na comparação entre os resultados mensurados e o cenário DS3, verificou-se decréscimo iguais a 2,638% e 7,799%, para produtividade em grão e biomassa, respectivamente.

Já no cenário DS5 (17/11/2020), foram alcançados os menores valores de produtividade em grãos e biomassa e mais distantes daqueles obtidos na data de semeadura de referência, indicando que a semeadura tardia também pode impactar na produção final da cultura, assim como a semeadura antecipada (DS1). No cenário DS5, a produtividade da cultura foi igual a 5.125 kg/ha, e, a biomassa, igual a 16.826 kg/ha. Em comparação com o cenário DS3, houve uma redução de 279 Kg/ha na produtividade, e de 1.831 Kg/ha na biomassa. Na comparação entre os resultados mensurados e o cenário DS2, verificou-se redução iguais a 5,443% e 9,877%, para produtividade em grão e biomassa, respectivamente.

Raja et al. (2018), salientou que o modelo AquaCrop conseguiria ser utilizado para prever a época de semeadura do milho, em Caxemira e Jammu, conforme a disponibilidade de água em um ecossistema de clima temperado.

4.4 Avaliação estatística do modelo AquaCrop

Os dados mensurados em campo, oriundos das coletas, foram confrontados com os dados estimados pelo modelo AquaCrop após a calibração dos parâmetros, e avaliados estatisticamente por meio do erro médio absoluto (EMA), índice de concordância de Willmontt's (d), raiz quadrada do erro médio (RMSE), eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), coeficiente de determinação (R^2) e índice de concordância (c), a fim de avaliar o desempenho do modelo na estimativa da produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja.

Na Tabela 10 está apresentada a análise estatística de desempenho do modelo AquaCrop na estimativa da produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja, considerando o cultivo de soja em três pivôs nas condições do Oeste da Bahia.

Tabela 10: Análise estatística do modelo AquaCrop. Erro Médio Absoluto (EMA), Índice de concordância de Willmontt's (d), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), a Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) e o Coeficiente de determinação (R²).

Parâmetro	Pivô	R ²	RMSE	EMA	NSE	d	c	Classificação
Produtividade	P8	0,999	0,016	0,016	1,000	0,999	1,000	Ótimo
	P4	0,999	0,070	0,070	0,989	0,997	0,997	Ótimo
	P16	0,999	0,024	0,024	0,987	0,997	0,997	Ótimo
	Média	0,999	0,037	0,037	0,992	0,998	0,998	Ótimo
Biomassa	P8	0,999	0,013	0,013	0,998	0,999	1,000	Ótimo
	P4	0,999	0,061	0,061	0,988	0,997	0,997	Ótimo
	P16	0,999	0,052	0,052	0,941	0,989	0,989	Ótimo
	Média	0,999	0,042	0,042	0,976	0,995	0,995	Ótimo

Analisando o desempenho do modelo para estimar a produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja através dos valores de R², nota-se que o modelo mostrou ótima precisão, com valores de R², para os três pivôs estudados, igual a 0,99. O valor de R² aponta que o modelo atingiu 100% da relação entre a produtividade em grãos e biomassa total mensurada em campo e a estimada pelo modelo. Dessa maneira, uma característica considerável do modelo agrícola é a possibilidade de prever uma condição de campo ainda não testada.

De acordo com os valores de RMSE, observa-se que o modelo apresentou melhor ajuste para o P8 (0,016) no quesito produtividade, e menor ajuste para o P4 (0,070). Ou seja, quanto menor o valor, maior a precisão do modelo. Para o acúmulo de biomassa, o melhor e o menor valor ajustado também foram obtidos para o P8 e P4, respectivamente. Os valores de EMA foram semelhantes aos de RMSE.

Os valores de NSE para a produtividade de grãos foi de 0,98 (P16), 0,98 (P4) e 1,000 (P8) e uma média de 0,99, indicando um excelente desempenho do modelo AquaCrop. O mesmo aconteceu para a biomassa, 0,99 (P8), 0,98 (P4) e 0,94 (P16), e uma média de 0,97. Abrha et al. (2012) encontraram resultados de NSE entre 0,72 e 0,81 ao utilizar o AquaCrop para simular a produtividade da cevada. Abi Saab et al. (2015), ao confrontar a precisão do AquaCrop com o CropSyst, obteve valor de NSE igual a 0,84 utilizando o modelo AquaCrop.

Os valores referentes ao índice de concordância Willmontt's (d) para produtividade foram iguais a 0,99 (P4), 0,99 (P8) e 0,99 (P16), com média aritmética de 0,99. Para a biomassa, esse índice foi igual a 0,99 (P4), 0,99 (P8) e 0,98 (P16). Tais resultados mostram que há concordância entre coletados resultados mensurados em campo e os resultados estimados pelo modelo.

Analisando os valores obtidos pelo índice de concordância (c), observa-se que a estimativa da produtividade e da biomassa para os três pivôs avaliados obtiveram valores de c superiores a 0,98, sendo classificadas como ótimo, conforme a classificação descrita por Camargo e Sentelhas (1997).

A análise estatística do modelo evidenciou que o modelo AquaCrop apresentou resultados satisfatórios na estimativa da produtividade em grãos e biomassa total da cultura da soja, nos três pivôs de estudo. Xu *et al.* (2019), realizou estudos com a cultura do arroz na China, onde verificou um ótimo desempenho do AquaCrop para estimar a cobertura do solo.

5 CONCLUSÕES

1. O modelo AquaCrop apresentou resultados satisfatórios na estimativa da produtividade em grãos e da biomassa total da cultura da soja, sendo classificado como ótimo, com valor de R^2 igual a 0,99 para os três pivôs, e média de 0,998 para o coeficiente de Willmott's (d) e o índice de concordância (c).
2. O uso da lâmina de 75% atingiu maior produtividade da cultura da soja, sendo cerca de 102 kg/ha maior que na lâmina de 100%, de acordo com os cenários de níveis de irrigação avaliados.
3. O modelo AquaCrop atingiu maior sensibilidade ao déficit hídrico nas fases fenológicas que compreendem o florescimento e o enchimento de grãos da cultura da soja, comparados ao estágio vegetativo. A interrupção da irrigação nessas fases pode comprometer a produtividade e o acúmulo de biomassa da cultura da soja.
4. As maiores produtividades da cultura da soja e as menores diferenças com a produtividade mensurada foram obtidas quando a semeadura da soja ocorreu entre 18/10/2020 e 28/10/2020.
5. O modelo calibrado neste estudo pode ser utilizado para estimar a produtividade em grãos e biomassa da cultura da soja submetida a diferentes cenários de produção, bem como cenários futuros, com confiabilidade, para as condições da região Oeste da Bahia.

REFERÊNCIAS

- ABEDINPOUR, M.; SARANGI, A.; RAJPUT, T.B.S.; SINGH, M.; PATHAK, H.; AHMAD, T. Performance Evolution of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid Environment. **Agricultural Water Management**, v.110, p. 55-66, 2012.
- ABEDINPOUR, M. Evaluation of the AquaCrop model in soybean cultivation at different planting times and deficit irrigation treatments. **Irã Agricultural Research**, v. 39, n. 2, p. 37-46, 2021.
- AIBA – Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia – Dados e Pesquisas, AIBA. 2021 Disponível em: <http://aiba.org.br/dados-e-pesquisa/>. Acesso em set. 2021.
- AIBA. Associação de agricultores e irrigantes da Bahia. Anuário agropecuário do oeste da Bahia – safra 2015/2016. 68p. Disponível em: <http://aiba.org.br/wp-content/uploads/2017/03/Anuario2015-16-FINAL-Web.pdf>
- AIBA - Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia. Dados de pesquisa das principais culturas - Soja. Relatório da safra 2017/2018- AIBA. 2018, Disponível em: Acesso: 11 de novembro de 2019.
- ALENCAR, L. P. **Parametrização do modelo Aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 133p, 2014.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALBUQUERQUE, V.B.C. 2015. **Código Florestal, estratégias de alocação de reserva legal e dinâmicas territoriais no oeste da Bahia: um estudo de caso em fazendas do agronegócio no município de Jaborandi**. 2015. 70 f., il. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Desenvolvimento Sustentável—Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- ALVES, ÉLVIS DA S. et al. **Avaliação de modelos para estimar a evapotranspiração real da cultura da soja submetida a diferentes condições de déficit hídrico**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 93, 2021.
- ASHRAF, M.; SHAHZAD, S. M.; AKHTAR, N.; IMTIAZ, M.; ALI, A. Salinization/sodification of soil and physiological dynamics of sunflower irrigated with saline sodic water amending by potassium and farm yard manure. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v.7, 2017, p.476-487.
- AVADHANI SS, ARUN AB, GOVINDA V, INAMDAR JSI (2019) **Crop Prediction Models - A Review**. In: **Emerging Technologies in Data Mining and Information Security**. Springer, Singapore, 2019. p. 13-17.
- ANA (Agência Nacional de Águas). Atlas irrigação: **uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - 2014**: relatório síntese / Agência Nacional de Águas. -- Brasília: ANA, 2016.

ANJOS, F.A. **Simulação de produtividade de milho em diferentes épocas de semeio em Arapiraca, Alagoas, pelo modelo AquaCrop**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Alagoas. 2011.

ARAYA, A.; HABTUB, S.; HADGUC, K.M.; KEBEDEA, A.; DEJENED, T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). **Agricultural Water Manage.** 97, 1838–1846. 2010.

BALBINOT JUNIOR, A. A. HIRAKURI, M. H. FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; RIBEIRO, R. H. **Análise da área, produção e produtividade da soja no Brasil em duas décadas (1997-2016)**. Embrapa Soja-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2017.

BATTISTI, E.; SENTELHAS, P.C.; BOOTE, K. J. **Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in Southern Brazil**. **Fiel Crops Research**, v. 200, p. 28-37, jan. 2018.

BISPO, R. de C. et al. **Manejo de irrigação para cultivo de pimentão em ambiente protegido**. In: IV INOAGRI INTERNATIONAL MEETING. Acesso em: dezembro. 2017. p. 2018.

BRIDA, A.L. CORREIA, E.C.S.S.; WILCKEN, S.R.S. Suscetibilidade de cultivares de soja ao nematoide das lesões radiculares. **Summa Phytopathologica**, v.43, n.3, p.248-249, 2017.

CABRAL, M. D. S. **Geração de demanda das cultivares de soja BRASMAX no Oeste baiano**. Universidade Federal do Tocantins - Gurupi, Set/2019.

CARVALHO, D.F.; ROCHA, H.S.; BONOMO, R.; SOUZA, A.P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.1, p.1-11, 2015.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMARGO, D. C. Manejo da Irrigação: como, quando e quanto irrigar? Fortaleza: INOVAGRI / IFCE, 2016.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO. Soja – análise mensal – setembro/2018.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – 2017

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – 2019

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos (V.7-SAFRA 2019/2020-N.1-Primeiro levantamento) /outubro de 2019.

DALL'AGNOL, A. (23 de novembro de 2017). **A saga da soja no Brasil e no Mundo**. Disponível em agrolink:https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/a-saga-da-soja-no-brasil-e-no-mundo_400724.html Acesso em 09/2021.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.M. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. **Rome Food and Agriculture Organization of United Nations**, p.193. 1979.

DOKOOHAKI H, GHEYSARI M, MOUSAVI S, ZAND-PARSA S, MIGUEZ F, ARCHONTOULIS S, HOOGENBOOM G (2016) **Coupling and testing a new soil water module in DSSAT CERES-Maize model for maize production under semi-arid condition**. Agric. Water Manag.163, 90–99.

EMBRAPA – Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. Soja em números (safra 2017/2018). Disponível em:<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-econômicos>>. Acesso em: 08/2021.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. AquaCrop Version 6.1 - New features and updates (May, 2018). Disponível em: Acesso em: nov./2021.

FARIAS JRB, NEPOMUCENO AL, NEUMAIER N (2007) **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1º ed., 9 p. (Circular Técnica, nº 48).

FERREIRA, I. C.; SILVA, R. P.; LOPES, A.; FURLANI, C.E.A. Perdas quantitativas na colheita de soja em função da velocidade de deslocamento e regulagens no sistema de trilha. **Engenharia na Agricultura**, v. 15, n. 2, p. 141-150, 2007.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State **University of Science and Technology**, p. 11, 1977. (Special Report, 80).

FISS, G.; SCHUCH, L.O.B.; PESKE, S.T.; CASTELLANOS, C.I.S.; MENEGHELLO, G.E.; AUMONDE, T.Z.; Produtividade e características agrônômicas da soja em função de falhas de semeadura. **Revista de Ciências Agrárias**, v.61, 2018.

FREITAS, M. C. M. **A cultura da soja no Brasil: O crescimento da produção brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7, N.12; 2011.

FREITAS, J.C. **Calibração do modelo Aquacrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

FUNDAÇÃO BA. Nota técnica: **Ameaça fitossanitária para a cultura da soja na safra 2019/20**. Disponível em: <https://fundacaoba.com.br/wp-content/uploads/2019/08/nota-tnica-fundao-ferrugem-.pdf>. Acesso em: 26/11/2021.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G.; CADAMURO, A. L. M. Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 542-550, setembro de 2007.

GAZZONI, DÉCIO LUIZ; DALL'AGNOL, AMÉLIO. **Paralelo entre a soja no mundo e no Brasil. In: SOJA: quebrando recordes: CESB: 10 anos de máxima produtividade.** Sorocaba: CESB., [s. l.], p. 37- 59, 2018.

HENNING, F. A.; MERTZ, L. M.; JUNIOR, E. A. J.; MACHADO, R. D.; FISS, G.; ZIMMER, P. D. **Composição química e mobilização de reservas em sementes de soja de alto e baixo vigor.** *Bragantina*, v. 69, n. 3, p. 727-733, 2010.

HENG, L.K., HSIAO, T., EVETT, S., HOWELL, T., STEDUTO, P., 2009. Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. **Agronomy Journal**. 101,488–498.

HSIAO, T. C.; HENG, L.; STEDUTO, P.; ROJAS-LARA, B.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop – the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 448–459. 2009.

ILARIO, C.G. **A região agrícola competitiva do Oeste Baiano.** Boletim Campineiro de Geografia, v.3, n.1, 2013.

KOPPEN, W. *Climatologia: com um estudo de los clima de la tierra.* México: **Fondo de Cultura Econômica**, 479 p., 1948.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 34, n. 1, p. 179-204, 2009.

MARKOVIĆ, MONIKA E JOSIPOVIĆ, MARKO E JANČIĆ TOVJANIN, MILENA E ĐURĐEVIĆ, VLADIMIR E RAVLIĆ, MARIJA E BARAČ, ŽELJKO (2020) Validando o modelo AquaCrop para produção de milho e soja de sequeiro e irrigado no leste da Croácia. **IDŐJÁRÁS / REVISTA TRIMESTRAL DO SERVIÇO METEOROLÓGICO HÚNGARO**, 124 (2). pp. 277-297. ISSN 0324-6329

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E PECUÁRIA (MAPA). Disponível em: Acesso em: 10 de nov. 2021.

MENEGATTI, A. L. A; BARROS, A. L. M. Análise comparativa dos custos de produção entre soja transgênica e convencional: um estudo de caso para o Estado do Mato Grosso do Sul. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília-DF, v. 45, n. 1, p. 163-183, 2007.

MÜLLER, L. Taxonomia e morfologia. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. **A soja no Brasil.** 1 ed. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, p. 65-104, 1981.

NAIN, A.; KERSEBAUM, K. **Calibration and Validation of CERES Model for Simulating. Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil–Crop Systems.**, p.161–181. 2009.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles.** J. Hydrol. v. 10 (3), p. 282-290, 1970

NAKAO, A. H.; COSTA, N. R.; ANDREOTTI, M.; SOUZA, M. F. P.; DICKMANN, L.; CENTENO, D. C.; CATALANI, G. C. Características agronômicas e qualidade fisiológica de sementes de soja em função da adubação foliar com boro e zinco. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, v. 27, n. 3, p. 312-327, 2018.

NUNES, A. C.; BEZERRA, F. M. L.; SILVA, R. S.; SILVA JÚNIOR, J. L. C.; GONÇALVES, F. B.; SANTOS, G. A. Agronomic aspects of soybean plants subjected to deficit irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 654-659, 2016.

NYAKUDYAA, I. W.; STROOSNIJDER L. 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**. V.146 p.280-296. 2014.

OLIVEIRA, C. T. D. **Modelo AquaCrop: Calibração, validação e uso para soja e milho na região dos Campos Gerais.** Universidade Federal do Paraná, Dez/2018.

OVANDO, G, SAYAGO S, BOCCO M (2018) Evaluating accuracy of DSSAT model for soybean yield estimation using satellite weather data. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 138, p. 208-217.

PIERDONÁ, H. L. (2016). **Comparação dos métodos de Penman Monteith original e da razão de Bowen para estimativa da evapotranspiração da cultura e do coeficiente de cultivo da soja (*Glycine max*).** Faculdade de agronomia e medicina veterinária, Brasília, jul. 2016.

PEIXOTO, C. P. CÂMARA, G. M. S.; MARTINS, M. C.; MARCHIORI, L. F. S. Efeito de épocas de semeadura e densidades de plantas sobre o rendimento de cultivares de soja no estado de São Paulo. **Revista de Agricultura, Piracicaba**, v. 77, n. 2, p. 265-293, 2002.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. AquaCrop - the FAO crop model to simulate yield response to water. II. Main algorithms and software description. **Agronomy Journal**, v. 101, p. 438-447. 2009

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T.; FERERES, E., 2012. **Reference Manual AquaCrop (Version 4.0).** AquaCrop (<http://www.fao.org/aquacrop/resources/traininghandbooks/en/>).

RAJA, W., HABIB KANTH, R., & SINGH, P. (2018). Validando o Modelo AquaCrop para milho em diferentes épocas de semeadura. **Política de Água**, 20, 826-840.

SANTOS, J. M. B. PEIXOTO, C. P.; SANTOS, J. M. B. BRANDELERO E. M.; PEIXOTO, M. F. S. P.; SILVA, V. **Desempenho vegetativo e produtivo de cultivares de soja em duas épocas de semeadura no Recôncavo Baiano.** Magistra, Cruz das Almas, v. 15, n. 2, p. 111-121, 2003.

SEAGRI – Secretaria de Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura – **Agronegócio na Bahia: Plantar, colher e alimentar bons resultados**, 2013. Disponível em: http://www.seagri.ba.gov.br/sites/default/files/Agronegocio_WEB_0.pdf. Acesso em: nov./2021

Serviço Geológico do Brasil – CPRM, **Estudos Hidrológicos e Hidro geológicos integrados na região do Aquífero Urucua**. Nov./2019.

SIHAG J, PRAKASH D. uma revisão: **Importância de várias técnicas de modelagem na agricultura / produção agrícola. Em: Soft Computing: Teorias e Aplicações**. Springer, Singapura, 2019. p. 699-707.

SILVA, R. N. O. da; MENEGHELLO, G. E. O cultivo da soja na região MATOPIBA: grandeza, desafios e oportunidades para a produção de grãos e sementes. **Revista SEED News**, vol. XX, n° 4. 2016.

SILVA, R. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e Pegada hídrica da soja cultivada na região do MATOPIBA**. Tese de doutorado em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande: UFCG, 2018.

SILVA LVD, CASAROLI D, EVANGELISTA AWP, ALVES JÚNIOR J, BATTISTI R (2019) Relação Intensidade-Duração-Frequência de Chuva para Análise de Risco na Região do Matopiba, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2019, 34.2: 247-254.

SILVA, V. DE P. R.; SILVA, R. A. E; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C. DA; SOUZA, E. P. DE; RODRIGUES, R. S.; SILVA, M. T.; HOLANDA, R. M. Calibration and validation of the AquaCrop model for the soybean crop grown under different levels of irrigation in the Matopiba region, Brazil. **Ciência Rural**, v.48, p.1-8, 2018.

SOUZA, C. **Nos interstícios da soja: resistências, evoluções e adaptações dos sistemas agrícolas localizados na região do Refúgio de Vida Silvestre Veredas do Oeste Baiano**. 2017. 311 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

STRICEVIC, R., COSIC, M., DJUROVIC, N., PEJIC, B., MAKSIMOVIC, L. Assessment of the FAO AquaCrop model in simulations of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. **Agricultural Systems**, out 2006.

STEDUTO P, HSIAO TC, FERERES E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, 101(3), 426-437, 2019.

SRIVASTAVA P, SINGH R, BHADOURIA R, TRIPATHI S, SINGH H, RAGHUBANSHI A. S. Understanding Soil Aggregate Dynamics and Its Relation With Land Use and Climate Change. In: Climate Change and Agricultural Ecosystems. **Woodhead Publishing**, p. 331-354, 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. Economics, Statistics and Market Information System. **World Agricultural Supply and Demand Estimates**. Disponível em: Acesso em 14/10/2021.

VAN KEULEN H, ASSENG S. **Simulation models as tools for crop management.** *Crop Science*, 433-452, 2019.

VILELA, R.; ARF, M.; TOMQUELSKI, G.; DIAS, A.; ANSELMO, J.; BERNART, L.; Estimativa do custo de produção do cultivo de soja na região dos chapadões – ano agrícola. **Pesquisa, Tecnologia e Produtividade**, Chapadão do Sul-MS, v. 1, n. 9, p. 208-212, 2016.

XAVIER, T. D. S. X.; DARONCH, D.; PELÚZIO, J. M.; AFFÉRI, F. S.; CARVALHO, E. V.; SANTOS, W. F. Época de colheita na qualidade de sementes de genótipos de soja, no Tocantins. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 241-245, 2015.

YOU J, LI X, LOW M, LOBELL D, ERMON S. **Deep gaussian process for crop yield prediction based on remote sensing data.** In **Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence**, february 2017.

ZHAO X, VAN DER MENSBRUGGHE DY, KEENEY RM, TYNER W. E. Improving the way land use change is handled in economic models. **Economic Modelling**, 2019.

ZEMOLIN, E. M. **Análise da evolução da competitividade e da inserção externa do complexo soja brasileiro.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ZIPPER SC, QIU J, KUCHARIK C. J. Drought effects on US maize and soybean production: spatio temporal patterns and historical changes. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, 2016.