UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA ESTIMADOS PELO AQUACROP NO ESTADO DE ALAGOAS

RIO LARGO – AL
2022

JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA ESTIMADOS PELO AQUACROP NO ESTADO DE ALAGOAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

ORIENTADOR
Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra

RIO LARGO – AL
2022

Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana

S237c Santos, José Wanderson Silva dos.

Componentes de produção da soja estimados pelo AquaCrop no estado de Alagoas. / José Wanderson Silva dos Santos. – 2022.

45 f.: il.
Orientador: Guilherme Bastos Lyra

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Curso de Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio largo, 2022.

Inclui BIbliografia
1. *Glycine max* (L.) Merrill. 2. Modelagem agrícola. 3. Produtividade.

CDU:633.34: 981.35

Folha de Aprovação

AUTOR: JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA ESTIMADOS PELO AQUACROP NO ESTADO DE ALAGOAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

gov.br Documento assinado digitalmente
GUILHERME BASTOS LYRA
Data: 21/02/2022 12:54:40-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

ORIENTADOR:_____
(Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra, Universidade Federal de Alagoas)

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
Gustavo Bastos Lyra
Data: 21/02/2022 13:47:30-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

_____
Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra (Examinador externo)

gov.br Documento assinado digitalmente
GUILHERME BASTOS LYRA
Data: 21/02/2022 12:51:45-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

_____
Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra (Examinador Interno)

_____
Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães (Examinador Interno)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA
COORDENAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ATA DE REUNIÃO DE BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 15 (quinze) dias do mês de fevereiro do ano de 2022, a Banca Examinadora de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) constituída pelos Professores: Dr. **Guilherme Bastos Lyra**, CECA/UFAL (orientador); Dr. **Gustavo Bastos Lyra**, UFRRJ e Dr. **Ivomberg Dourado Magalhães**, CECA/UFAL, sob a Presidência do Professor Guilherme Bastos Lyra, emitiram pareceres relativos ao TCC intitulado **"COMPONENTES DE PRODUÇÃO DA SOJA ESTIMADOS PELO AQUACROP NO ESTADO DE ALAGOAS",** do aluno **JOSÉ WANDERSON SILVA DOS SANTOS**, sob matrícula **16210710**, requisito obrigatório para conclusão do Curso de Agronomia. Esses pareceres que ficaram anexados à pasta do aluno, tem como resultado as notas e resultado: Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra, nota 9,7(nove, sete), Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra, nota 9,7(nove, sete), e Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães, nota 9,7(nove, sete). Apuradas as notas, o candidato foi considerado **APROVADO**, com média geral 9,7(nove, sete). Na oportunidade o candidato foi notificado do prazo de máximo de 30 (trinta) dias, a partir desta data, para entregar a Coordenação do Trabalho de Conclusão de Curso, devidamente protocolada, da versão definitiva do trabalho defendido, em 4 (quatro) vias, impressas e encadernadas e uma cópia digitalizada em CD com as correções sugeridas pela Banca, sem o que esta avaliação se tornará sem efeito, passando o aluno a ser considerado reprovado. Nada mais havendo a tratar, os trabalhos foram encerrados para a lavratura da presente ATA, que depois de lida e achada conforme, vai assinada por todos os membros da Banca Examinadora, pelo coordenador (a) do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) e pelo coordenador (a) do Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal de Alagoas.

Rio Largo/AL, 15 de fevereiro de 2022.

gov.br Documento assinado digitalmente
GUILHERME BASTOS LYRA
Data: 21/02/2022 15:45:24-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

1ºExaminador _____
Prof. Dr. Guilherme Bastos Lvra (Orientador)

gov.br Documento assinado digitalmente
Gustavo Bastos Lyra
Data: 21/02/2022 18:50:28-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

2ºExaminador _____
Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra

3ºExaminador Ivomberg Dourado Magalhães
Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães

gov.br Documento assinado digitalmente
Reinaldo de Alencar Paes
Data: 22/02/2022 13:41:41-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Coordenador do TCC _____
Prof. Dr. Reinaldo de Alencar Paes

gov.br Documento assinado digitalmente
Reinaldo de Alencar Paes
Data: 22/02/2022 13:44:55-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Coordenador do Curso de Agronomia _____
Prof. Dr. Reinaldo de Alencar Paes

DEDICATÓRIA

A Deus, que me presenteia todos os dias com a energia da vida, que me dá forças e coragem para atingir os meus objetivos;

Aos meus amados pais, José Alves dos Santos e Maria Josefa Silva dos Santos, exemplos de honestidade e humildade, pelo apoio em todo meu processo de formação e toda educação com carinho e paciência.

Ao meu irmão José Tarciso, Tatiana e Tatielle, pelo apoio e companheirismo.

A todos que contribuíram com minha formação, amigos, colegas e orientadores.

DEDICO!

AGRADECIMENTO

Aos meus pais e irmãos, por todo amor e carinho durante minha trajetória de vida e educação;

Ao meu orientador, professor Dr. Guilherme Bastos Lyra, por todos os ensinamentos, conselhos, confiança e amizade durante a graduação; ao professor Dr. Iêdo Teodoro, pelos ensinamentos e conselhos;

Aos professores do LIA: Ricardo Araújo, Marcos Alex, André Carvalho, Gustavo Lyra Ivomberg Dourado e Alexsandro Almeida pelas orientações e incentivos;

Ao professor Dr. Mauro Wagner de Oliveira, pela amizade e ensinamentos compartilhados;

Ao corpo docente do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, pelas contribuições na minha formação;

Aos colegas e amigos de laboratório: Constantino Cavalcante, Wemerson Saulo, Manoel Alpiano, Iêdo Peroba, Jair Quintela, Marcos Antonio, Joyce Lopes, Julianna Catonio, Jonathan Tenório, José Antonio, Jailton Aciole e William Alexandre pela boa convivência, ajuda e amizade;

A minhas amigas de turma, Alana Lima e Débora Pimentel, pela amizade e convivência;

A FAPEAL pelas concessões de bolsas;

A todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho e acreditaram no meu empenho.

MUITO OBRIGADO!

EPÍGRAFE

“Querer ser bem-sucedido sem trabalhar duro é como querer colher sem plantar”.

(David Bly)

RESUMO

O avanço na produção de soja nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas é uma opção para a diversificação do agronegócio local. Por esse motivo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo *AquaCrop*® para simulação dos componentes de produção da cultura da soja e identificar as correlações entre os dados de biomassa e rendimento de grãos. Os dados de entrada para avaliação do modelo foram obtidos em dois experimentos instalados de campo no *Campus* de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas: um irrigado (E1), durante a estação seca, e outro em sequeiro (E2) na estação chuvosa da região. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso com cinco repetições. As variedades avaliadas foram a M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2). Foi avaliado o modelo *AquaCrop*® utilizando dados de campo obtido nas condições agrometeorológicas de Rio Largo, AL. O desempenho deste modelo foi avaliado por meio de comparações estatísticas, como o índice de concordância, coeficiente de correlação de Pearson, índice de confiança, porcentagem de desvio e raiz quadrada do erro médio. Na avaliação do modelo AquaCrop® houve subestimativa do acúmulo de biomassa para C2 - E1, C1 - E2 e C2 - E2, de -9,77; -2,25 e -3,93%, respectivamente, enquanto para C1 - E2 ocorreu superestimativa de 0,77%. O índice de concordância de Willmott (d) foi 0,99, para C1 e C2 - E1, e 0,97 e 0,94, para C1 - E2 e C2 -E2, respectivamente. O coeficiente de correlação de Pearson variou de 0,99 (C1 - E1) a 0,91 (C2 - E2). O índice de confiança variou de 0,98 a 0,91, para C1 - E1 e C2 - E2, respectivamente. A raiz quadrada do erro médio variou de 1,02 a 1,37 (t ha^{-1}) para C2 -E1 e C1 -E2, respectivamente. A produtividade de grãos, apresentou superestimativa para a cultivar M-8349 (C1) em 1,18 (E1) e 5,38% (E2), assim como para cultivar BMX-POTÊNCIA (C2) em 0,13% (E2). Ocorreu subestimativa de -1,03% na primeira época para a cultivar BMX-POTÊNCIA. O modelo *AquaCrop*® tem ajuste satisfatório para a cultura da soja nas condições de clima e solo na região de Rio Largo, AL.

Palavras-chave: Modelagem agrícola; *Glycine max* (L.) Merrill; Produtividade.

ABSTRACT

The advance in the production of soybean in the Coastal Tablelands of Alagoas is an option for the diversification of local agribusiness. For this reason, the objective of the present work was to evaluate the performance of the *AquaCrop*® model for simulating the components of soybean production and to identify the correlations between biomass data and grain yield. The input data for the evaluation of the model were obtained in two experiments installed in the field at the Campus of Agricultural Sciences of the Federal University of Alagoas: one irrigated (E1), during the dry season, and another in rainfed (E2) in the rainy season of the region. The experimental design used was in randomized blocks with five replications. The varieties evaluated were M-8349 (C1) and BMX-POWER (C2). The *AquaCrop*® model was evaluated using field data obtained under the agrometeorological conditions of Rio Largo, AL. The performance of this model was evaluated through statistical comparisons, such as the concordance index, Pearson's correlation coefficient, confidence index, percentage deviation and square root of the mean error. In the evaluation of the *AquaCrop*® model, there was an underestimation of the biomass accumulation for C2 - E1, C1 - E2 and C2 - E2, of -9.77; -2.25 and -3.93%, respectively, while for C1 - E2 there was an overestimation of 0.77%. The Willmott concordance index (d) was 0.99, for C1 and C2 - E1, and 0.97 and 0.94, for C1 - E2 and C2 - E2, respectively. Pearson's correlation coefficient ranged from 0.99 (C1 - E1) to 0.91 (C2 - E2). The confidence index ranged from 0.98 to 0.91, for C1 - E1 and C2 - E2, respectively. The square root of the mean error ranged from 1.02 to 1.37 (t ha-1) for C2 -E1 and C1 -E2, respectively. Grain yield was overestimated for the cultivar M-8349 (C1) by 1.18 (E1) and 5.38% (E2), as well as for the cultivar BMX-POWER (C2) by 0.13% (E2). There was an underestimation of -1.03% in the first season for the BMX-POTÊNCIA cultivar. The *AquaCrop*® model has a satisfactory fit for the soybean crop in the climate and soil conditions in the region of Rio Largo, AL.

Keywords: Agricultural modeling; *Glycine max* (L.) Merrill; Productivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição dos grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil.....19

Figura 2. Localização da área experimental no município de Rio Largo, AL. 23

Figura 3. Chuva, evapotranspiração de referência (ET_0) e temperatura mínima e máxima do ar em relação aos Dias Após a Semeadura (DAS), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019, na região de Rio Largo, AL. 32

Figura 4. Chuva, evapotranspiração de referência (ET_0) e temperatura mínima e máxima do ar em relação aos dias após a semeadura, no período de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019, na região de Rio Largo, AL. 33

Figura 5. Dados observados (pontos com desvio médio) e simulados de biomassa (t ha^{-1}) para a cultivar M-8349, em relação aos dias após a semeadura, no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1), na região de Rio Largo, AL.....34

Figura 6. Dados observados (pontos com desvio médio) e simulados de biomassa (t ha^{-1}) para a cultivar M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2) em relação aos dias após a semeadura, no período de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL. 35

Figura 7. Análise de regressão para biomassa acumulada (t ha^{-1}) observada e simulada para as cultivares M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL. 37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das cultivares de soja utilizadas nos dois ciclos de cultivo, na região de Rio Largo, AL. 24

Tabela 2. Análise química do solo da área experimental do CECA/UFAL, antes da instalação do experimento com soja, outubro de 2018, em Rio Largo, AL. 24

Tabela 3. Parâmetros físicos hídrico do solo da área experimental em Rio Largo - AL, Ponto de murcha permanente – (PWP); Capacidade de campo – (FC); Conteúdo de água na saturação – (SAT). 26

Tabela 4. Observações fenológicas para o modelo AquaCrop® com a cultura da soja M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL. ... 27

Tabela 5. Índice de confiança e critérios de desempenho. 30

Tabela 6. Acúmulo de biomassa e desvio percentual observados e simulados para avaliação do modelo AquaCrop® para as cultivares de soja M-8349 (1) e BMX-POTÊNCIA (2), na região de Rio Largo, AL. 36

Tabela 7. Avaliação estatística de simulações e observações de acúmulo de biomassa das cultivares M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), para avaliação do modelo AquaCrop®, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância Willmont (d), índice de concordância Willmont (d), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (t ha^{-1}), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL. 38

Tabela 8. Erro Relativo (Er) entre o rendimento de grãos observado (Oi) e simulado (Si) para cultivares de soja, no modelo AquaCrop®, no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região Rio Largo, AL. 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AL – Alagoas

B - Biomassa

BSacum - Biomassa acumulada

c – Índice de Confiança

CC - Cobertura do dossel

CECA – Campus de Engenharias e Ciências Agrárias

CO_2 – Dióxido de carbono

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

d – Índice de Concordância de Willmott

DAS – Dias após a semeadura

Er – Erro relativo

ET_0 – Evapotranspiração de referência

FAPEAL – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas

IAF - Índice de área foliar

IC – Índice de colheita

LIA - Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia

N – Nitrogênio

n – Número de observações

Oi – Valor observado

Pe – Percentagem de desvio

ppm – Partes por milhão

r – Coeficiente de correlação de Pearson

R^2 - Coeficiente de determinação

RG - Rendimentos de grãos

RMSE – Raiz quadrada do erro médio

S – Desvio padrão

Si – Valor simulado

T_x – Temperatura do ar máxima

T_n – Temperatura do ar mínima

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

WP – Water productivity

Y – Rendimento de grãos

Z - Profundidade efetiva do sistema radicular

ō – Média dos valores observados

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **16**

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **18**

2.1. Aspectos gerais da cultura da soja 18

2.2. Relações hídricas e variáveis ambientais 20

2.3. Modelagem agrícola 21

3. MATERIAL E MÉTODOS **23**

3.1. Localização da área experimental 23

3.2. Delineamento experimental e tratos culturais 23

3.3. Apresentação do modelo *AquaCrop*® 25

3.3.1. Parâmetros meteorológicos 25

3.3.2. Parâmetros do solo 25

3.3.3. Irrigação 26

3.3.4. Parâmetros fenológicos 27

3.4. Análise dos dados modelados 28

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES **32**

4.1. Variáveis meteorológicas 32

4.2. Acúmulo de Biomassa 33

4.2.1. Análise estatística para o acúmulo de biomassa 36

4.2.2. Regressão linear para acúmulo de Biomassa total 36

4.2.3. Análise estatística para o acúmulo de biomassa 37

4.3. Rendimento agrícola 39

5. CONCLUSÕES **40**

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **41**

1. INTRODUÇÃO

O avanço na produção de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas é uma opção para a diversificação do agronegócio local. Referente a esse crescimento pode ser observado pelos dados relativos à produtividade de soja no estado de Alagoas nas safras 2018/2019 (2,8 t ha^{-1}), 2019/2020 (3,0 t ha^{-1}) e 2020/2021 (3,6 t ha^{-1}), apesar de ser uma cultura nova no estado a produtividade é acima da média nacional de 3,52 t ha^{-1} de acordo com CONAB (2021). Com o desenvolvimento de tecnologias, como por exemplo, desenvolvimento ou introdução de cultivares adaptadas às características edafoclimáticas e, a definição de tecnologias agronômicas para as localidades específicas, é possível aumentar o potencial produtivo dessa leguminosa em regime de sequeiro na Zona da Mata e Agreste alagoano e, com irrigação, no Sertão.

A Zona da Mata alagoana apresenta uma dificuldade para determinar a janela de cultivo ideal para soja, pois na região verifica-se uma quadra chuvosa entre os meses de maio a agosto, nesse intervalo pode ocorrer excesso hídrico e, no restante do ano, um período de estiagem (CARVALHO *et al*., 2013). O excesso ou déficit de água prejudicam o crescimento e o desenvolvimento da soja (CHAVARRIA *et al*., 2015; MACHADO *et al*., 2017).

O estresse hídrico configura-se como grande causador de quebras de produção de soja em regiões áridas e semiáridas ao redor do mundo (ANDROCIOLI *et al*., 2020). O manejo adequado dos recursos hídricos é fundamental para melhorar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada e de sequeiro. A irrigação em excesso, deficiente ou no momento inadequado, pode comprometer a produção agrícola. O conhecimento sobre a quantidade e o momento da disponibilidade da água necessária para soja possibilita o aumento da produtividade com a utilização da mesma área de cultivo (GAVA *et al*., 2015).

Existe vários tipos de modelos existente, sendo os mais importantes classificados em conceituais, físicos e matemáticos. Um modelo é representado por uma linguagem específica, com objetivo a condução de fenômenos naturais em cenários distintos. Os modelos matemáticos de crescimento de culturas são desenvolvidos com o intuito de solucionar adversidades nas variações de produtividade, mediante alterações ocorridas ao longo dos cultivos agrícolas (PESSOA *et al*., 1997).

Uma das principais vantagens dos modelos matemáticos voltados à agricultura é a possibilidade da análise do sistema de produção antes de implantá-lo, evitando possíveis erros

de planejamento e funcionamento. Permite ainda minimizar custos com a previsão das práticas de manejo que melhor se ajustam ao cenário presente ou futuro (SENTELHAS *et al*., 2001; TOJO-SOLER *et al*., 2001; MELLO e CAIMI, 2008). Da mesma forma, os modelos possuem proveitos na pesquisa, com auxílio na interpretação de resultados experimentais e simulação do crescimento e desenvolvimento das culturas em múltiplos cenários, o que reduz e diminui custos com a necessidade da instalação e condução de longos e complexo experimentos de campo (WHISLER *et al*., 1986).

O modelo *AquaCrop*® possui, relativamente, poucos parâmetros conservativos da cultura que são os valores *default* do modelo, de modo que simula o rendimento da safra final em quatro etapas fáceis de entender, o que torna o enfoque da modelagem transparente. As etapas consistem na simulação do crescimento e desenvolvimento da cobertura do dossel da cultura, da transpiração da cultura, da biomassa acima do solo e do rendimento final da colheita (VANUYTRECHT *et al.*, 2014). Para melhor aproveitamento dos benefícios do modelo, é imprescindível que o usuário compreenda todas as etapas da simulação (FOSTER *et al*., 2017).

Nestas condições é evidente a importância do estudo da cultura da soja e sua implantação em Alagoas utilizando a modelagem como uma das ferramentas. Diante disso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho do modelo *AquaCrop*® em simular o crescimento e produtividade da cultura da soja, na Região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos gerais da cultura da soja

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma das principais culturas agrícolas do mundo. No Brasil, por conta da sua composição química, com alto teor proteico, tem múltiplas aplicações na alimentação humana e animal, além de ser a principal *commodity* do agronegócio (CRUZ *et al.*, 2016). Por isso, o cultivo dessa oleaginosas tem um importante papel socioeconômico para a agricultura brasileira devido ao seu elevado potencial produtivo nas diferentes regiões climáticas do País. Além disso, a soja é matéria-prima indispensável para o funcionamento de diversos complexos agroindustriais, tais como as indústrias de óleos, fertilizantes, agrotóxicos e máquinas agrícolas (MAUAD *et al.*, 2010).

A produção de soja no Brasil na safra 2020/2021 foi 135,91 milhões de toneladas, área cultivada de 38,53 milhões de hectares. No Nordeste brasileiro a área ocupada com essa leguminosa foi 3,54 milhões de hectares e produção de 12,81 milhões de toneladas. Em Alagoas a produção ainda é considerada pequena com 7,6 mil toneladas, área para o cultivo foi 2,1 mil ha^{-1}, (CONAB, 2021). Em relação a isso, considerando apenas a área local destinada para produção de grãos na safra 2020/2021 (87,9 mil ha^{-1}), os dados mostram que a área plantada com soja representa apenas 2,4% da área cultivada com grãos no Estado, esse percentual indica uma margem para o incremento da produção de soja em Alagoas.

A utilização de pacotes tecnológicos e a facilidades para colheita mecanizada nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, fazem com que essa cultura seja uma alternativa para a alimentação animal de elevada qualidade devido aos aspectos nutricionais e o potencial para produção de matéria seca. As práticas culturais realizadas corretamente podem proporcionar uma redução nos custos referentes à alimentação dos animais, pois com a utilização de forragem de alta qualidade, pode-se diminuir o fornecimento de rações concentradas, que têm maiores custos (REZENDE *et al*., 2012).

A soja é uma planta com mecanismo de fixação de carbono do tipo C3. Contudo, é uma das C3 que sofrem redução de carbono fotossintético e não possuem mecanismo de concentração de CO_2 (MANGENA, 2018), diferençando-se de outros grãos como milho, arroz e sorgo. Seu ciclo produtivo é bastante variado e depende da interação genótipo (cultivar) por ambiente (BATTISTI e SENTELHAS, 2014). A soja é extremamente influenciada pelo fotoperíodo, assim, em dias curtos, a planta tende a acelerar o florescimento, podendo incidir

negativamente na produtividade (BORÉM, 2005). Em razão disso, a latitude é um elemento importante no momento da adaptação de certos genótipos. Assim, as variedades na América se dividem em 12 grupos, os quais contemplam genótipos de acordo com o tempo em dias que se passa entre a semeadura e a maturação fisiológica (Figura 1). Essa definição levou em conta o comportamento das plantas sob diferentes latitudes e condições ambientais no território nacional (ALLIPRANDINI *et al*., 2009; CAVASSIM *et al*., 2013).

Figura 1. Distribuição dos grupos de maturidade relativa de cultivares de soja no Brasil.

Fonte: Adaptado de Allprandini *et al.,* (2009).

As variedades de soja podem apresentar três tipos de crescimento: determinado, indeterminado e semideterminado. Predominantemente, a soja plantada no Brasil apresenta tipo determinado, que se caracteriza pelos seguintes atributos: crescimento vegetativo nulo após o florescimento, florescimento uniforme em toda a planta, desenvolvimento de vagens no topo e na base da planta, tamanho similar das folhas e concentração de vagens no nó terminal (MACHADO *et al.,* 2017).

2.2. Relações hídricas e variáveis ambientais

A cultura da soja apresenta característica de alta plasticidade, que consiste na capacidade de se adaptar às condições ambientais e de manejo, por meio de modificações na morfologia e nos componentes de rendimento, a fim de adequá-los ao espaço disponível e à condição de competição imposta pelo arranjo de plantas (PIRES *et al.,* 2000). A associação de arranjos espaciais e população de plantas, tem se destacado como ferramentas potenciais para o aumento da produtividade (BRACHTVOGEL *et al.,* 2009) e, podem ser estudados em campo, na condição de experimento e, ou com a utilização de modelos que simulam cenários climáticos e de produtividade agrícola.

As condições climáticas influenciam diretamente sobre a dinâmica do rendimento anual das safras agrícolas, inclusive é capaz de representar uma perda de 47% em relação à produtividade média de soja (SENTELHAS *et al*., 2015; BATTISTI *et al.,* 2018). Esses efeitos negativos ainda podem se acentuar com o aumento da escassez da água disponível para a agricultura (MANGENA, 2018).

Os recursos hídricos tornam-se mais limitados devido à mudança climática o que sugere aumentar a eficiência do uso da água na agricultura para garantir principalmente a segurança alimentar (COELHO, 2021). Os efeitos negativos do desperdício da água podem levar a prejuízos econômicos e ambientais, tais como, lixiviação de agroquímicos, eutrofização de água, aumento dos custos de energia elétrica, entre outros (FRIZZONE *et al.*, 2012). Com o crescente apelo por preservação dos recursos hídricos faz-se necessária a utilização de técnicas e manejo que melhorem a eficiência do uso da água na produção agrícola (HSIAO *et al*., 2009).

A soja é uma cultura que tem o pico de exigência hídrica no momento da floração e enchimento de grãos (7 - 8 mm dia^{-1}). Dependendo da cultivar e das características edafoclimáticas da região, o período de crescimento da soja varia de 90 a 135 dias, requerendo uma lâmina total de irrigação para fechamento do seu ciclo sem restrições hídricas de 450 a 800 mm (LUDWIG *et al.*, 2011; SEDIYAMA, 2015).

De acordo com Farias *et al.* (2007), a soja se adapta melhor nas regiões que apresentam temperaturas do ar entre 20 e 30°C; com 25°C o valor ideal para uma emergência rápida e uniforme. As regiões com temperaturas do ar menores ou iguais a 10 °C são impróprias para o cultivo da soja, pois interfere negativamente no crescimento e desenvolvimento. A soja floresce somente quando é induzida a temperaturas do ar acima de 13°C. Já quando a soja é submetida

a temperaturas do ar acima de 40°C, verifica-se efeito adverso na sua taxa de crescimento, provocando distúrbios na floração o que pode acarretar diminuição na altura da planta e diminuição da capacidade de retenção das vagens. As altas temperaturas também podem acarretar maturação acelerada da soja, e se associadas a alta umidade podem interferir na qualidade dos grãos. Vale ressaltar que todos esses problemas podem ser agravados se, ao mesmo tempo, ocorrer déficits hídricos.

2.3. Modelagem agrícola

Modelo é uma teoria científica que procura reproduzir de forma simplificada o funcionamento do sistema real (DOURADO NETO *et al.,* 1998; CORRÊA *et al.,* 2011). Tais modelos têm suas descrições formadas em linguagem matemática por meio de simplificações do sistema, sendo representados por: componentes, variáveis, parâmetros e relações funcionais. O sistema atua com rotinas de entrada de dados, gerando saídas em forma de relatórios, gráficos ou tabelas (PESSOA *et al*., 1997; BERNADON e CALGARO, 2007).

Os modelos na maioria das vezes necessitam de conhecimento e experiencia avançado de modelagem para sua calibração, além disso, alguns modelos são específicos para determinadas culturas (VANUYTRECHT *et al*., 2014; MANIRUZZAMAN *et al*., 2015). A maioria dos modelos existentes muitas vezes requerem uma grande quantidade de variáveis de entrada e parâmetros que não estão facilmente acessíveis para a diversidade de culturas e ambientes ao redor do mundo.

Na literatura especializada, podem ser mencionadas diversas pesquisas com aplicação de modelagem na agricultura (HE *et al*., 2017; ANDRADE *et al.*; 2017). Apesar das semelhanças, cada modelo é construído com diferentes níveis de requisitos de entrada, processos e ciclos de simulação, de forma que a escolha do modelo é uma etapa decisiva no que se diz respeito a simular produtividade (TSAKMAKIS *et al*., 2019).

Os modelos matemáticos são ferramentas utilizadas para a previsão de safras e tem importância crescente no setor público e privado, pois, podem estimar a produção agrícola e as flutuações do mercado, garantir a segurança alimentar, aprimorar práticas de manejo agrícola e uso de recursos. Em cenários com perspectiva de mudanças climáticas a modelagem tem alcançado maior visibilidade no momento atual, visto que algumas culturas podem expressar

mudanças morfofisiológicas com reflexo sobre a produtividade (BARBOSA *et al*., 2019; LECERF *et al*., 2019).

A necessidade de desenvolvimento e melhoria contínua da modelagem agrícola partiu das incertezas nos momentos de tomadas de decisões, o que levou pesquisadores a criar e sugerir uma variedade de modelos, desde o conceitual, o mecanicista e o estocástico. Desse modo, desde o início da modelagem, modelos como *AquaCrop*® (RAES *et al*., 2009; STEDUTO *et al.*, 2009), Apex (GASSMAN et al., 2009), Mohid Land (SIMIONESEI *et al.*, 2016), Daisy (HANSEN *et al*., 1991), Simetaw (MANCOSU *et al.,* 2016), dentre outros, são utilizados para simulação com precisão satisfatória para várias culturas.

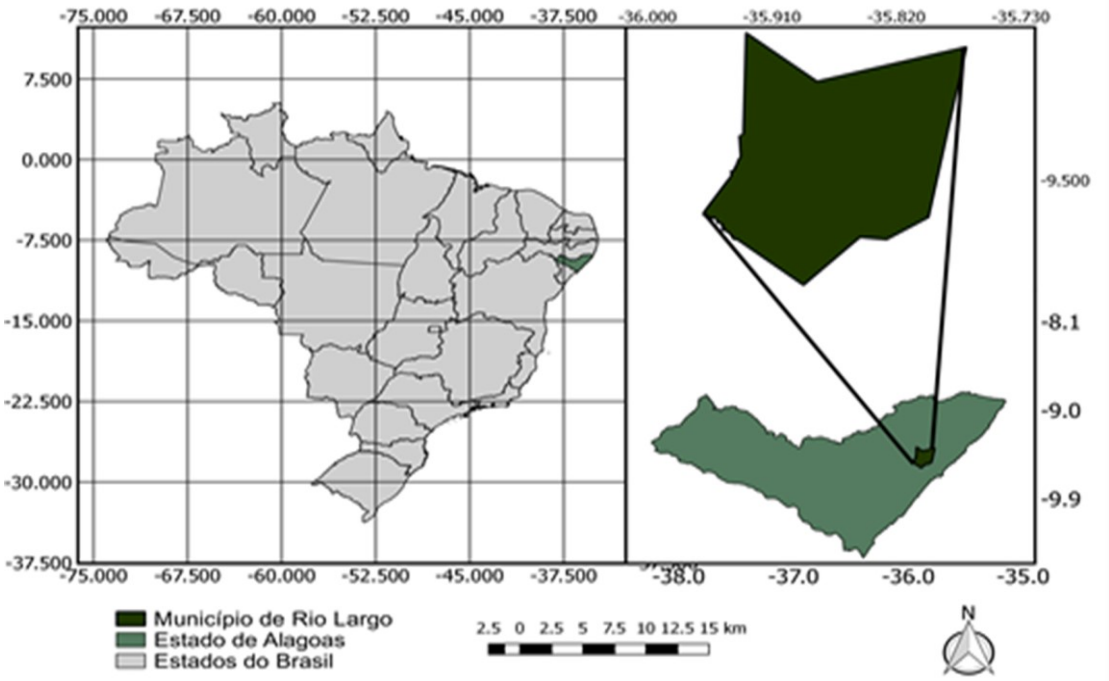
A capacidade do modelo *AquaCrop*® para simular a produtividade de diferentes culturas foi amplamente testada por diversos pesquisadores ao redor do mundo, em diferentes tipos de ambientes e todos relataram resultados positivos, como por exemplo: na China (XIANGXIANG *et al.,* 2013); algodão (*Gossypium hirsutum* L.), na Macedônia (LINKER E IOSLOVICH, 2017); óleo de canola (*Brassica napus* L.) na Austrália (ZELEKE *et al*., 2011); milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e ervilha (*Pisum sativum* L.) em Portugal (PAREDES *et al.,* 2014); milho no Brasil (ANJOS, 2011); cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) no Brasil (ALENCAR, 2014); soja no Líbano (ABI SAAB *et al*., 2015), na China (PAREDES *et al.,* 2015),e na região do Matopiba, Brasil (SILVA *et al*., 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área experimental

Os parâmetros necessários para avaliação do modelo *AquaCrop*® foram obtidos através de dois experimentos realizados na área experimental do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), Rio Largo - AL, região dos Tabuleiros Costeiros alagoanos, com as seguintes coordenadas geográficas: 09°28'02" de latitude sul e 35°49'43" de longitude oeste, 127 m de altitude (Figura 2).

Figura 2. Localização da área experimental no município de Rio Largo, AL.



Fonte: Adaptado pelo autor.

3.2. Delineamento experimental e tratos culturais

Foram utilizados dois experimentos semelhantes, tendo como distinção a utilização de irrigação suplementar e a época de plantio. No primeiro, o plantio foi realizado no dia 14 de novembro de 2018 e colheita no dia 18 de março de 2019, durante a estação seca (E1), com utilização de irrigação suplementar. No segundo, o plantio foi no dia 20 de junho de 2019 e colheita no dia 09 de outubro de 2019, durante a estação chuvosa (E2).

O delineamento estatístico foi em blocos ao acaso, com cinco repetições, em parcelas de 10 linhas com 5 m, espaçadas à 0,5 m. Foi utilizada uma população de 350.000 plantas por hectare (CRUZ *et al*., 2016). As cultivares de soja utilizadas foram: AS-3730, BMX-POTÊNCIA, BRS-9383, M-6210, M-8349 e M-6410. No entanto, utilizou-se para avaliação do modelo os tratamentos correspondentes a M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), pois apresentam diferentes características fisiológicas (Tabela 1).

Tabela 1. Características das cultivares de soja utilizadas nos dois ciclos de cultivo, na região de Rio Largo, AL.

Cultivar	Grupo de maturação	Hábito de crescimento	Evento tecnológico
M-8349	8.3	Determinado	Intacta RR2 PRO
BMX-POTÊNCIA	6.7	Indeterminado	Roundup Ready 2

Fonte: Autor (2022).

O preparo de solo ocorreu por meio de duas gradagens, a adubação de fundação foi determinada baseado na análise química e recomendação para a cultura da soja, de acordo com o manual técnico de Pernambuco (IPA, 2008), foram distribuídos 640 kg ha^{-1} do formulado 15-30-23, nível de 96, 192 e 147 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 e K_2O (Tabela 2).

Tabela 2. Análise química do solo da área experimental do CECA/UFAL, antes da instalação do experimento com soja, outubro de 2018, em Rio Largo, AL.

[1]Prof.	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H + Al	[2]CTC_t
m	H_2O	---mg dm^{-3}----			----------Cmol.dm^{-3}----------				
0 - 0,2	5,5	3	20	10	1,89	1,23	0,09	4,66	3,3
0,2 - 0,4	6,1	4	25	10	2,5	1,89	0	3,12	4,49
Prof.	[3]CTC_T	MO	[4]V	[5]m	Sat. Ca	Sat. Mg	Sat. K	Sat. Na	-
m	Cmol.dm^{-3}	g kg^{-1}	----------%----------						-
0 - 0,2	7,87	26,3	41	3	24	15,6	0,6	0,5	-
0,2 - 0,4	7,61	29	59	0	32.9	24,8	0,8	0,5	-

[1]Profundidade (Prof.); Capacidade de troca de cátions efetiva (CTCt); Capacidade de troca de cátions total (CTC_T); [4]Saturação por bases (V); [5]Saturação por alumínio (m).

O manejo de plantas daninhas foi efetuado em pré-emergência (Flumioxazina 500 g L^{-1}) e em pós-emergência (glifosato N-(fosfonometil) glicina – 370 g L^{-1} + Glifosato 445 g L^{-1}). O controle de pragas foi realizado com a aplicação de inseticidas (Imidacloprido 700 g kg^{-1}) e (Lambda – cialotrina 50 g L^{-1}). O fungicida (Tebuconazol 200 g L^{-1} + Trifloxistrobina 100 g L^{-1}) foi utilizado como forma de prevenção contra doenças fúngicas (AGROFIT, 2018).

3.3. Apresentação do modelo *AquaCrop*®

Avaliou-se o modelo *AquaCrop*®, versão 6,1 desenvolvido pela FAO (RAES *et al*., 2009). O software utilizado para criar os bancos de dados foi Microsoft Office® 2016 (Bloco de Notas). As simulações foram realizadas com inserção de arquivos de entrada necessários para o modelo.

3.3.1. Parâmetros meteorológicos

De acordo com a classificação de Thornthwaite e Mather, o clima da região é caracterizado, como úmido, megatérmico (quente), com deficiência de água moderada no verão e excesso de água no inverno. As médias climatológicas anuais (1972-2010), precipitação pluvial média é 1789,5 mm, temperatura do ar média é de 25,4º C e umidade relativa do ar média 81,1% (FERREIRA JUNIOR *et al*., 2014).

Utilizaram-se as variáveis: temperatura do ar máxima e mínima diária, precipitação pluvial e evapotranspiração de referência – ET_0 (estimada pelo método Penman-Monteith-FAO), com os dados de entrada provenientes da estação agrometeorológica do Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia - LIA). A concentração média anual de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico para o ano de 2000 (369,47 ppm = 716,0 mg m^{-3}) o modelo usa como padrão dados registrados no Observatório do Mauna Loa, no Havaí (RAES *et al.*, 2017), e ajustado pelo modelo para o respectivo ano simulado.

3.3.2. Parâmetros do solo

O solo local foi classificado como Latossolo Amarelo coeso Argissólico de textura médio-argilosa (MORAIS et al., 2017). A topografia do terreno é plana com declividade inferior a 2%. Em seguida, criou-se o arquivo de entrada referente as características do perfil do solo,

necessários ao *AquaCrop*®, como: densidade e textura do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e conteúdo volumétrico de água na saturação (Tabela 3), esses arquivos foram compostos pelas variáveis coletadas na área experimental do CECA/UFAL na região de Rio Largo, AL por Sarmento (2015).

Tabela 3. Parâmetros físicos hídrico do solo da área experimental em Rio Largo - AL, Ponto de murcha permanente – (PWP); Capacidade de campo – (FC); Conteúdo de água na saturação – (SAT).

Textura do solo	Camadas do solo	Densidade (g cm^{-3})	Conteúdo volumétrico de água no solo (mm /mm^{-1})		
			PWP	FC	SAT
Médio argilosa	0-10	1,36	0,12	0,20	0,40
	10-20	1,44	0,13	0,22	0,43
	20-30	1,52	0,14	0,24	0,43

Fonte: Adaptado pelo Autor.

3.3.3. Irrigação

A irrigação no primeiro experimento foi realizada por meio do sistema por aspersão convencional, com aspersores espaçados a 12 x 12 m, pressão de serviço de 30 m.c.a, vazão média de 0,50 m^3 h -1 e intensidade de aplicação de 3,6 mm h^{-1}. As lâminas aplicadas ao longo do experimento, foram registradas pelas leituras em hidrômetros, a quantidade de água aplicada foi determinada baseado na evapotranspiração da cultura – ETc, obtido pela equação 1. O banco de dados para irrigação foi composto pela quantidade de água diária disponibilizada para o primeiro ciclo de cultivo.

$$ETc = ET_0 * Kc \quad (1)$$

em que: ET_c - evapotranspiração da cultura, (mm dia^{-1}); ET_0 - evapotranspiração de referência, (mm dia^{-1}) e coeficiente da cultura – kc (ALLEN et al., 1998).

3.3.4. Parâmetros fenológicos

Considerou-se a ausência de restrição nutricional para os experimentos, baseado nas adubações requeridas pela cultura, sendo desprezível a avaliação para estresse de fertilidade de solo, buscou-se controlar a disponibilidade integral de toda fonte de nutriente fornecida a planta por meio de controle permanente pragas e doenças, que viessem a impactar negativamente na absorção das plantas.

Os estádios fenológicos foram observados diariamente, com o intuito de identificar as alterações visuais de acordo com a classificação proposta por Fehr e Caviness (1977). As avaliações de crescimento necessárias para a avaliação do modelo (Tabela 4), como: índice de área foliar (IAF), datas de emergência, máxima cobertura do dossel (CC), duração da floração, início da senescência, profundidade efetiva do sistema radicular (Z) e Biomassa acumulada (B).

Tabela 4. Observações fenológicas para o modelo *AquaCrop*® com a cultura da soja M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL.

Descrição	M-8349		BMX-POTÊNCIA		Unidade
	E1	E1	E2	E2	
Plantio	14/11/2018	14/11/2018	20/06/2019	20/06/2019	-
Colheita	18/03/2019	18/03/2019	09/10/2019	09/10/2019	-
Emergência	5	5	5	5	DAS
Floração	45	43	36	33	DAS
Duração da floração	11	7	13	10	DAS
Senescência	113	90	98	75	DAS
Maturação	122	111	120	90	DAS
Profundidade efetiva das raízes	53	53	53	53	DAS
Densidade de plantio	350000	350000	350000	350000	planta ha^{-1}
Índice de Colheita	34,30	27,3	45,23	49,43	%
Biomassa acumulada	19,39	12,36	12,92	6,42	t ha^{-1}
Produtividade	5,90	3,33	5,36	3,03	t ha^{-1}

Fonte: Autor (2022).

O rendimento de grãos observado foi calculado a partir da massa seca dos grãos, coletadas na área útil de 4,0 m^2 de cada parcela e posteriormente simulado, para um hectare, Equação 1.

$$RG = \frac{m}{(C*E)} * 10.000 \quad (1)$$

em que: RG é o rendimento de grãos; m - massa colhida na área amostrada (4,0 m², em t); C - comprimento das linhas de plantio na área amostrada (m); E é o espaçamento entre as linhas (m) e o fator 10.000 destina-se a converter os valores para hectare.

Outro importante parâmetro do modelo é o índice de colheita (IC), conforme a equação 2, com rendimentos de grãos a 13% de umidade.

$$IC = \frac{RG}{BSacum} \quad (2)$$

em que: IC é o índice de colheita; RG é o rendimento de grãos e BSacum é a biomassa acumulada até o estádio fenológico de maturação.

3.4. Análise dos dados modelados

Análise das simulações, a partir da acurácia e precisão do desempenho do modelo em relação aos dados de saída para a avaliação do modelo será realizada por meio de comparações entre os dados simulados e observados utilizando testes e índices estatísticos. Os valores de biomassa acumulada (B) e rendimento de grãos (RG) foram avaliados com base nos indicadores estatísticos como: índice de concordância, coeficiente de correlação de Pearson, índice de confiança e porcentagem de desvio e raiz quadrada do erro médio.

O Índice de Concordância foi proposto por Willmott (1982) avalia a concordância existente entre os pontos simulados e observados por meio da aproximação ou afastamento dos dados, esse coeficiente é representado pela letra (d), que varia de zero a um, em que zero indica a nulidade e um indica a exatidão, de acordo com a equação 3.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}\right] \quad (3)$$

em que: Si é o valor simulado pelo modelo no dia i; Oi é o valor observado no dia i; ō é a média dos valores observados.

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r) mede o grau de associação entre duas variáveis, indicando a correlação entre os dados observados e simulados, essa correlação pode ser positiva ou negativa de acordo com, Rodrigues (2008), equação 4.

$$r = \left[\frac{\sum XY - \frac{\sum X * \sum Y}{n}}{(n-1)\, S_x * S_y}\right] \quad (4)$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson; ΣXY é a soma dos produtos entre os valores de X e Y; ΣX * ΣY é o produto da soma dos valores de X e Y; n é o número de observações; Sx é o desvio padrão dos valores de x; Sy é o desvio padrão dos valores de y.

O Índice de confiança “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997) sendo utilizada com o objetivo de indicar o desempenho dos métodos (Tabela 5), utilizando o produto entre o coeficiente de correlação e o índice de concordância de Willmott (equação 5).

$$c = (r * d) \quad (5)$$

Tabela 5. Índice de confiança e critérios de desempenho.

Valor de "c"	Desempenho do modelo
>0,85	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

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

A Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) é utilizada para quantificar a performance geral do modelo sintetizando a diferença média entre os valores observados e simulados (equação 6). Uma das vantagens do RMSE é que, essa diferença é dada na mesma unidade das variáveis observadas e simuladas (NYAKUDYA e STROOSNIJDER, 2014). Os valores de RMSE são sempre positivos, assim variam de 0 a infinito e quanto mais próximo o valor de 0, melhor desempenho de simulação do modelo. Entretanto, assim com R^2, o RMSE não diferencia a superestimação da subestimação.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n-1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n-1}} \quad (6)$$

em que: RMSE é a raiz quadrada do erro médio (t ha^{-1}); Si é o valor simulado pelo modelo; Oi é o valor observado e n é o número de dados.

A Porcentagem de Desvio indica a subestimativa ou superestimava entre os valores observados e simulados (TOJO SOLER, 2004). Essa porcentagem é dada pela equação 7.

$$PE = \left[\frac{S_i - O_i}{O_i}\right] * 100 \quad (7)$$

em que: PE é a percentagem de desvio; Si é o valor simulado pelo modelo e Oi é o valor observado.

O erro relativo (equação 8) foi calculado para comparar o rendimento de grãos simulado com os dados observados.

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^{n} |Oi - Si|}{\sum_{i=1}^{n} Oi} * 100 \quad (8)$$

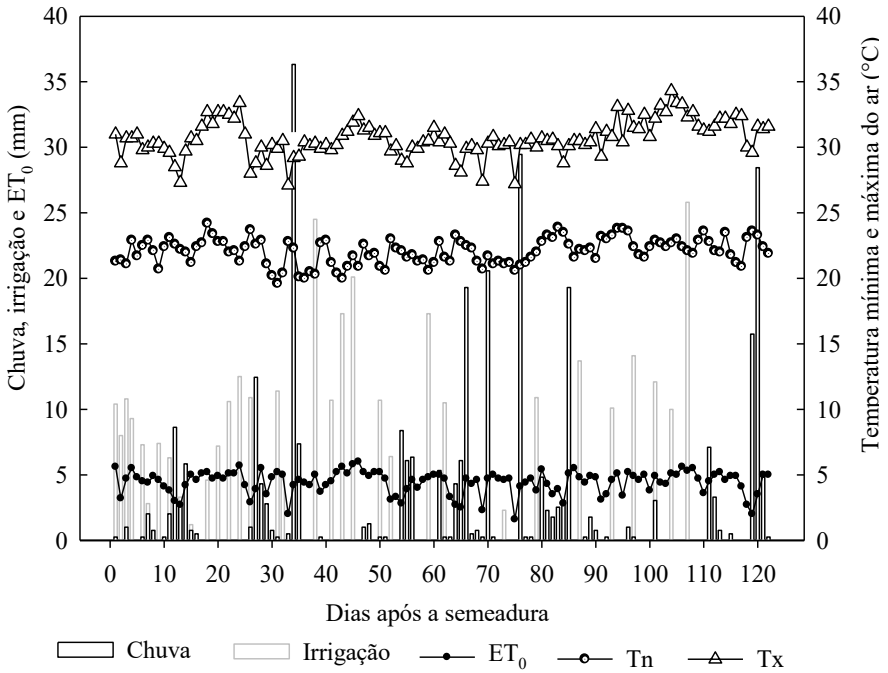
em que: Er – erro relativo (%), Si é o valor simulado pelo modelo e Oi é o valor observado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Variáveis meteorológicas

A temperatura do ar mínima e máxima, nos 125 dias de cultivo, no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1), variou, respectivamente, entre 22,0 e 30,5 °C, com média de 25,7°C (Figura 3). De acordo com Basttisti e Sentelhas (2014) as condições térmicas são favoráveis para o crescimento e desenvolvimento da cultura da soja, uma vez que os dados apresentam valores muito próximos aos ideais, entre 20 a 30 °C. A evapotranspiração de referência, variou entre 1,6 a 6,0 mm, média de 4,42 mm dia^{-1}, com total 552,90 mm. Nesse mesmo período, o total de chuva foi 234,80 mm, por isso foram aplicados 345,82 mm de irrigação.

Figura 3. Chuva, evapotranspiração de referência (ET_0) e temperatura mínima e máxima do ar em relação aos Dias Após a Semeadura (DAS), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019, na região de Rio Largo, AL.

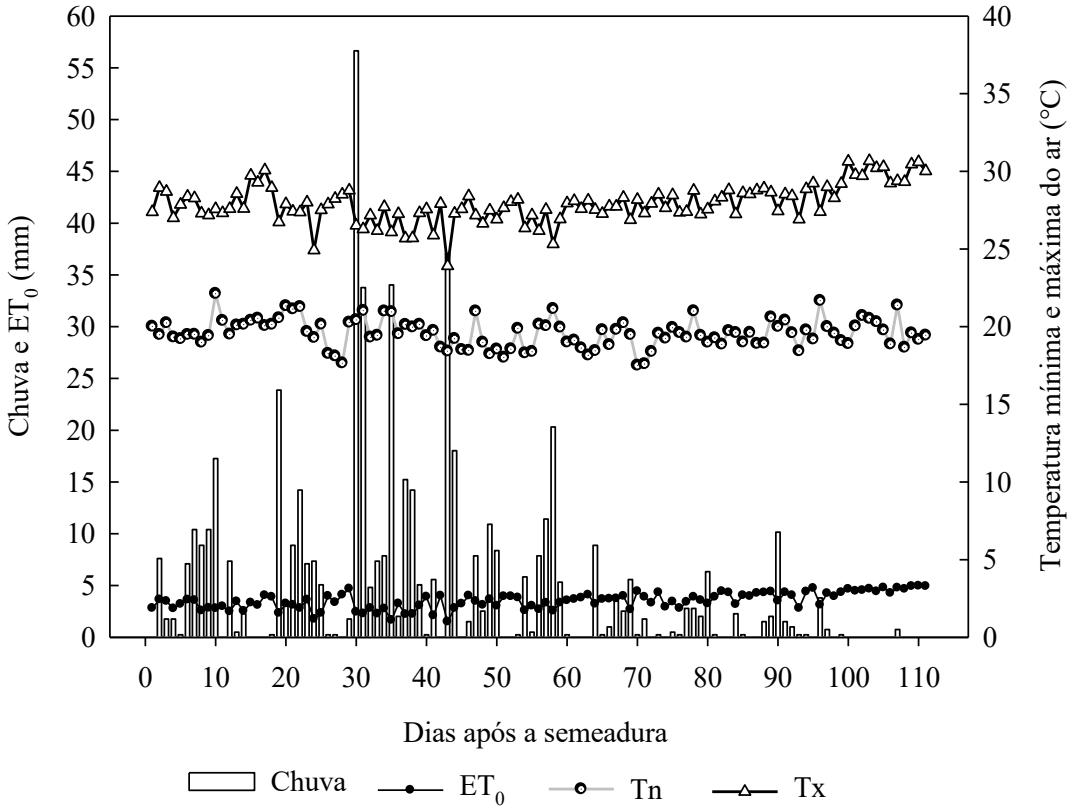


Fonte: Autor (2022).

A temperatura do ar mínima e máxima ar foi de 19,6 e 27,9 °C, respectivamente, (Figura 4), média de 23,2 °C. A evapotranspiração de referência, nos 111 dias de cultivo, no período de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), oscilou entre 1,5 mm 08/08/19 e 4,9 mm

nos dias 06, 07 e 08/10/19, média de 3,5 mm dia^{-1}, com total 389,8 mm, com isso, a evapotranspiração de referência total foi 373 mm.

Figura 4. Chuva, evapotranspiração de referência (ET_0) e temperatura mínima e máxima do ar em relação aos dias após a semeadura, no período de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019, na região de Rio Largo, AL.



Fonte: Autor (2022).

Nesse mesmo período, o total de chuvas foi de 573,6 mm, consequentemente, não houve deficiência hídrica, de modo que ainda ocorreu excesso hídrico total de 164 mm, por conta das chuvas de 56,6 e 33,8 mm nos dias 19 e 20 de julho de 2019. A demanda hídrica da cultura da soja ficou abaixo da faixa descrita como ideal que varia entre 450 a 800 mm (SEDIYAMA, 2015), porém a precipitação supriria o mínimo recomendado.

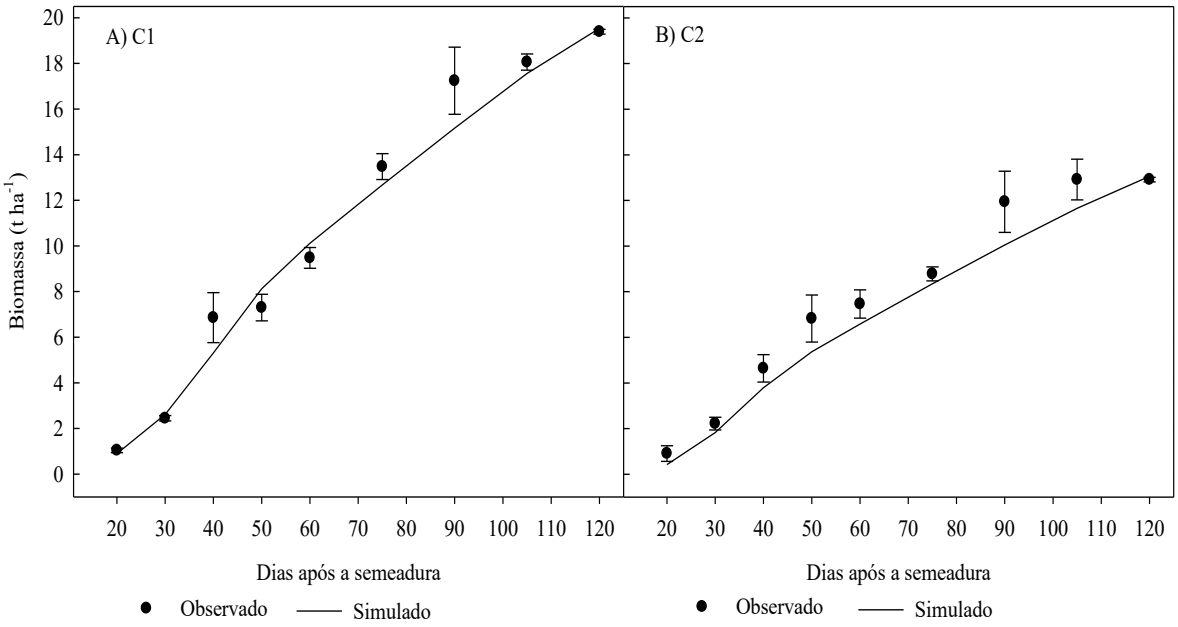
4.2. Acúmulo de Biomassa

O acúmulo de biomassa da cultura da soja, cultivares M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), durante os dois ciclos de cultivo (E1 e E2) simulado pelo modelo *AquaCrop*®, na região

de Rio Largo, AL, foi avaliado com análises entre a biomassa observado e simulado por meio do modelo. Com base nas análises estatísticas realizadas, as interações entre simulações e observações foram satisfatórias para os dois ciclos e para ambas as cultivares analisadas.

Ao avaliar a interação apresentada durante o ciclo da C1 - E1 (Figura 5A), verificou-se que os pontos coletados (20, 30, 50, 60, 75, 105 e 120 DAS) apresentam menor desvio padrão (0,10; 0,12; 0,58; 0,46; 0,57; 0,35 e 0,11) com acúmulo de biomassa observada de: 1,04; 2,45; 7,30; 9,47; 13,48; 18,06 e 19,39 t ha^{-1}, o acúmulo de biomassa simulado foi: 0,90; 2,62; 5,31; 10,12; 12,68; 17,56 e 19,54 t ha^{-1}. Por outro lado, os pontos avaliados em 40 e 90 DAS apresentaram maior desvio padrão de 1,09 e 1,47, respectivamente, o acúmulo de biomassa total observado foi 6,86 e 17,24 t ha^{-1} e o simulado 5,31 e 15,16 t ha^{-1}.

Figura 5. Dados observados (pontos com desvio médio) e simulados de biomassa (t ha^{-1}) para a cultivar M-8349, em relação aos dias após a semeadura, no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1), na região de Rio Largo, AL.



Fonte: Autor (2022).

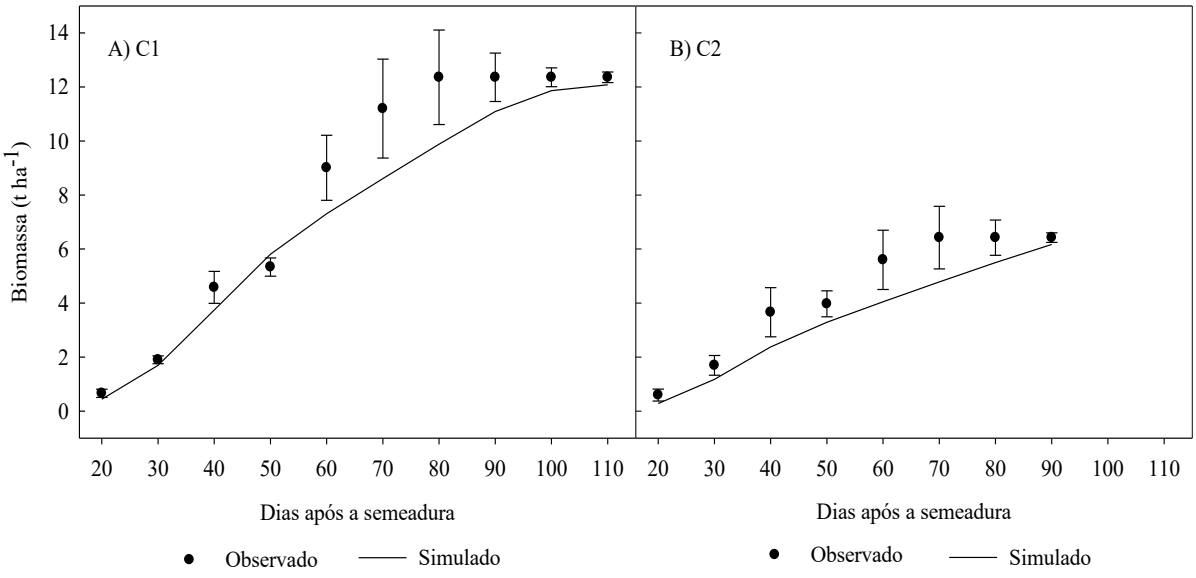
A C2 - E1 (Figura 5B), apresentou as menores taxas de desvios padrão aos 20, 30, 40, 60, 75 e 120 DAS, com 0,34; 0,28; 0,60; 0,62; 0,31; e 0,10, o acúmulo de biomassa observada foi 0,91; 2,22; 4,64; 7,46; 8,78 e 12,92 t ha^{-1}, o acúmulo de biomassa simulado foi: 0,42; 1,82; 3,79; 6,59; 8,35 e 13,06 t ha^{-1}. Por outro lado, os pontos avaliados em 50, 90 e 105 DAS apresentaram pontos avaliados tiveram menores interações, assim o desvio padrão foi 1,03;

1,34 e 0,89, respectivamente, o acúmulo de biomassa total observado foi 6,83; 11,94 e 12,29 t ha^{-1} e o simulado 5,37; 10,05 e 11,66 t ha^{-1}.

A C1 – E2 (figura 6A), constatou-se que os primeiros quatros pontos coletados (20, 30, 40 e 50 DAS) apresentam menor desvio padrão (0,15; 0,14; 0,60 e 0,33), com acúmulo de biomassa observado de: 0,66; 1,90; 4,58 e 5,33 t ha^{-1}, os acúmulos de biomassa simulados foi: 0,44; 1,70; 3,74 e 5,8 t ha^{-1}. Os pontos avaliados em 60, 70, 80 e 90 DAS apresentaram maior desvio padrão de 1,20, 1,83; 1,75 e 0,90, respectivamente, o acúmulo de biomassa total observado foi 9,01; 11,20; 12,36 e 12,36 t ha^{-1} e o simulado 7,31; 8,61; 9,88 e 11,09 t ha^{-1}.

Os dois últimos pontos avaliados em 100 e 110 DAS voltaram a apresentar menor desvio padrão de 0,35 e 0,20, respectivamente, o acúmulo de biomassa total observado foi 12,34 t ha^{-1} e o simulado 11,87 e 12,01 t ha^{-1}. Costa e Barros (2001) apresentaram resultados similares aos encontrados no presente trabalho, em que demostram tendência de aumento da dispersão de pontos ao longo do ciclo de cultivo, afirmando que os processos físicos e biológicos são mais complexos e mais difíceis de serem simulados por meio de modelagem.

Figura 6. Dados observados (pontos com desvio médio) e simulados de biomassa (t ha^{-1}) para a cultivar M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2) em relação aos dias após a semeadura, no período de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL.



Fonte: Autor (2022).

Pela análise de acúmulo de biomassa para a cultivar C2 – E2 (Figura 6B), observou-se menor correlação entre os pontos observados e simulados, do ponto três ao sete (40, 50, 60, 70, 80 DAS), correspondendo a grande parte do ciclo da cultura. Ao isolarmos os pontos um, dois

e oito (20, 30 e 80 DAS), observou-se a tendência de aumento da interação, o acúmulo de biomassa observada foi 0,60; 1,70 e 6,42 t ha^{-1}, as simulações demonstraram que os valores foram: 0,28; 1,18 e 6,17 t ha^{-1}, com desvio padrão de 0,20; 0,36 e 0,18. Em trabalho realizado com a cultura do milho, Abedinpour *et al*. (2012) entendem que as simulações de biomassa próximas aos valores observados em campo estejam relacionadas por estarem sob condições ideais.

4.2.1. Análise estatística para o acúmulo de biomassa

Com a finalidade de comparar o acúmulo total de biomassa simulada e observada durante o experimento conduzido para avaliação do modelo *AquaCrop*® por meio da porcentagem de desvio (Tabela 6), observou-se que as menores variações ocorreram na C1, E1 houve superestimativa de 0,77%, para E2 ocorreu subestimativa de -2,25. C2 constataram-se subestimativas para E1 e E2, -9,77 e -3,93, respectivamente.

Tabela 6. Acúmulo de biomassa e desvio percentual observados e simulados para avaliação do modelo AquaCrop® para as cultivares de soja M-8349 (1) e BMX-POTÊNCIA (2), na região de Rio Largo, AL.

Cultivares	Época	Acúmulo final de biomassa (t ha^{-1})		
		Observado	Simulado	% Desvio
M-8349	1	19,39	19,54	0,77
M-8349	2	12,36	12,08	-2,25
BMX-POTÊNCIA	1	12,92	11,66	-9,77
BMX-POTÊNCIA	2	6,42	6,17	-3,93

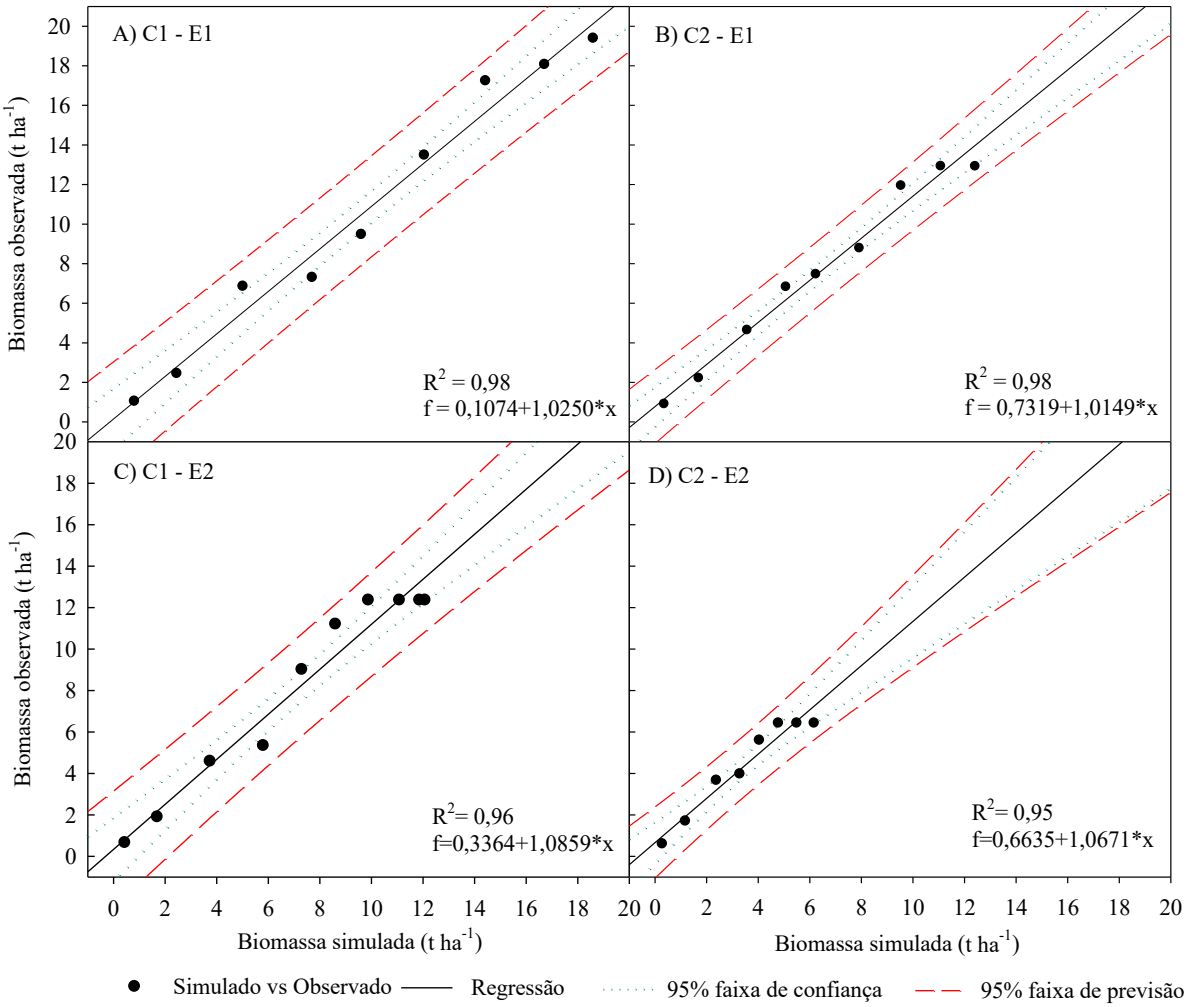
Fonte: Autor (2022).

4.2.2. Regressão linear para acúmulo de Biomassa total

Ao avaliar a regressão linear entre o acúmulo de biomassa simulada e observada (Figura 7), para as duas cultivares na primeira época (E1) utilizadas para avaliação do modelo *AquaCrop*®, verificou-se que o coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,98. Na segunda época (E2) o R^2 foi similar a E1, com valores de 0,96 e 0,94, para C1 e C2, respectivamente. Toumi *et al.* (2016) em trabalhos semelhantes realizados com a cultura do trigo no Marrocos, observaram o coeficiente de determinação 0,89, corroborando com os resultados observados. Valores similares a esse foram encontrados por Araya *et al*. (2010) para cultura da cevada

(*hordeum vulgare* l.), com R^2 = 0,80; Stricevic *et al*. (2011) para cultura do milho, com R^2 = 0,84; e Abedinpour *et al*. (2012), com R^2= 99.

Figura 7. Análise de regressão para biomassa acumulada (t ha^{-1}) observada e simulada para as cultivares M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL.



Fonte: Autor (2022).

4.2.3. Análise estatística para o acúmulo de biomassa

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi 0,99 (C1 -E1), 0,98 (C2 -E1), 0,98 (C1 - E2) e 0,97 (C2 -E2) aferindo, portanto, a alta correlação entre os dados de acúmulo de biomassa observado e simulado. O índice de concordância de Willmott (d) foi 0,99, para C1 e C2 -E1, e 0,97 e 0,94, para C1 -E2 e C2 -E2, respectivamente, esse valor afere a concordância existente

entre os dados observados e simulados por meio do modelo *AquaCrop*® (Tabela 7). Os índices de concordância de Willmott foram superiores aos obtidos por Battisti, *et al*. (2017), com índice "d" = 0,68 para a soja no Sul do Brasil.

O índice de confiança (c) foi classificado como ótimo de acordo com o desempenho do modelo *AquaCrop*®, por apresentar 0,98 (C1 -E1), 0,97 (C2 -E1), 0,95 (C1 -E2) e 0,91 (C2 -E2). O RMSE foi relativamente baixo para as duas cultivares, com valores variando de 1,02 a 1,37 (t ha^{-1}) para C2 -E1 e C1 -E2, respectivamente, demonstrando a boa performance do modelo *AquaCrop*®. Resultados semelhantes foram encontrados em várias pesquisas realizadas em diversas partes do globo, nos últimos anos com o modelo *AquaCrop*®, como: Mabhaudhi *et al*. (2014) para cultura do taro (*Colocasia esculenta* L. Schott), encontraram valores de R^2 = 0,98, d = 0,99 e RMSE = 1,26 t ha^{-1}. Bello e Walker (2017), para cultura do amaranto (*Amaranthus cruentus*) obtiveram valores de R2 = 0,91, d = 0,91 e RMSE = 1,96 t ha^{-1}. Battisti *et al*. (2017) encontraram R2 = 0,71 e d = 0,91. Silva *et al*. (2018) encontraram R2 = 0,94 e d = 0,96 para a cultivar de soja MSOY 9144 RR e R2 = 0,93 e d = 0,99 para a cultivar TMG 1288 RR, para cultura da soja.

Tabela 7. Avaliação estatística de simulações e observações de acúmulo de biomassa das cultivares M-8349 (C1) e BMX-POTÊNCIA (C2), para avaliação do modelo AquaCrop®, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância Willmont (d), índice de concordância Willmont (d), índice de confiança (c) e raiz quadrada do erro médio (t ha^{-1}), no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região de Rio Largo, AL.

Coeficientes	1ª ÉPOCA		2ª ÉPOCA	
	C1	C2	C1	C2
r	0,99	0,98	0,98	0,97
d	0,99	0,99	0,97	0,94
c	0,98	0,97	0,95	0,91
RMSE (t ha^{-1})	1,05	1,02	1,37	1,03

Fonte: Autor (2022).

4.3. Rendimento agrícola

A produtividade final de grãos foi observada de 5,904 (C1) e 5,362 (C2) t ha^{-1} e simulada de 5,835 (C1) e 5,418 (C2) t ha^{-1} para primeira época (E1). Na segunda época (E2) os valores observados foram 3,330 (C1) e 3,030 (C2), e simulado foi 3,160 e 3,026, C1 e C2, respectivamente (Tabela 8). De modo geral, os dados observados e simulados apresentaram erros absolutos próximos, assim, indicaram novamente a eficácia do modelo para tomadas de decisões. RAES *et al*. (2012) consideram que erros de até 0,5 t ha^{-1} para a cultura da soja são considerados aceitáveis em simulações com modelos matemáticos.

Em seguida, avaliou-se o desempenho do modelo *AquaCrop*® para a produtividade de grãos, houve superestimativa para a cultivar M-8349 (C1) em 1,18 (E1) e 5,38% (E1), assim como para cultivar BMX-POTÊNCIA (C2) foi 0,13%. Ocorreu subestimativa de -1,03% na primeira época para a cultivar BMX-POTÊNCIA. De acordo com Akumaga *et al*. (2017) e Battisti *et al*. (2017) os modelos podem superestimar as produtividades simuladas, o que o mesmo foi desenvolvido para simular a produtividade que pode ser obtida na teoria, desconsiderando, pragas e doenças, e efeito do fotoperíodo no desenvolvimento da soja e, leva ao acréscimo ou redução na estimativa da produtividade para datas de plantio precoce e tardia.

Tabela 8. Erro Relativo (Er) entre o rendimento de grãos observado (Oi) e simulado (Si) para cultivares de soja, no modelo AquaCrop®, no período de 14 de novembro de 2018 a 18 de março de 2019 (E1) e de 20 de junho de 2019 a 09 de outubro de 2019 (E2), na região Rio Largo, AL.

Cultivares	ÉPOCA	Observado	Simulado	Er
		(t ha^{-1})		(%)
M-8349	1	5,904	5,835	1,18
M-8349	2	3,330	3,160	5,38
BMX-POTÊNCIA	1	5,362	5,418	-1,03
BMX-POTÊNCIA	2	3,030	3,026	0,13

Fonte: Autor (2022).

5. CONCLUSÕES

- O modelo *AquaCrop*® apresenta desempenho satisfatório entre valores observados e simulados de acúmulo de biomassa e rendimento de grãos, ilustrando a robustez e a aplicabilidade geral do modelo para cultura da soja, na região de Rio Largo, AL;

- O modelo *AquaCrop*® subestima o acúmulo de biomassa, para cultivar BMX-POTÊNCIA sob condição de sequeiro e irrigado. Para cultivar M-8349 o acúmulo de biomassa para foi superestimado na estação seca, com utilização de irrigação suplementar. Houve subestimativa na estação chuvosa, em regime de sequeiro;

- O rendimento de grãos foi superestimado pelo modelo para as cultivares M-8349 e BMX-POTÊNCIA, durante a estação chuvosa, em regime de sequeiro. Durante a estação seca, com utilização de irrigação suplementar a cultivar M-8349 apresentou superestimativa e, subestimativa para BMX-POTÊNCIA.

.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEDINPOUR, M.; SARANGIB, A.; RAJPUTB, T. B. S.; SINGH, M.; PATHAKC, H.; AHAMAD, T. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. Agriculture Water Management. 110, 55–66. 2012.

ABI SAABA, M. T.; TODOROVICB, M.; ALBRIZIOC, R. Comparing AquaCrop and CropSyst models in simulating barleygrowth and yield under different water and nitrogen regimes. Doescalibration year influence the performance of crop growth models? Agricultural Water Management. v. 147, p. 21–33, 2015.

AKUMAGA, U.; TARHULE, A.; YUSUF, A. A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in 49 Nigeria, West Africa. Agricultural and Forest Meteorology, v. 232, p. 225-234, jan. 2017.

ALENCAR, L. P. Parametrização e validação do modelo aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar. 2014. 117 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, C. L. T.; AMARAL, T. A.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; HEINEMANN, A. B.; GARCIA, A. G.; TOJO-SOLER, C. M.; SILVA, D. F.; HICKMANN, C.; SANTANA, C. B.; MOURA, B. F.; CASTRO, L. A. Modelagem do crescimento de culturas: aplicações à cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Documentos, 91.

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). Agric. Water Manage. 97, 1838–1846. 2010.

BARBOSA, M. A.; FERRAZ, R. L. S.; COUTINHO, E. L. M.; COUTINHO NETO, A. M.; SILVA, M. S.; FERNANDES, C.; RIGOBELO, E. C. Multivariate analysis and modeling of

soil quality indicators in long-term management systems. Science of The Total Environment, v. 657, p. 457-465, 2019

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. New agroclimatic approach for soybean sowing dates recommendation: A case study. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 11, p. 1149-1156, 2014. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1149-1156.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in Southern Brazil. Field Crops Research, v. 200, p. 28-37, jan. 2017.

BELLO, Z. A.; WALKER, S. Evaluating AquaCrop model for simulating production of amaranthus (Amaranthus cruentus) a leafy vegetable, under irrigation and rainfed. Agricultural and Forest Meteorology.v. 247, p. 300–310, 2017.

BERNARDON, T.; CALGARO, M. Modelo de simulação do crescimento de plantas. Ambiência. 2007; 3:283-294.

BRACHTVOGEL, E. L.; PEREIRA, F. R. S.; CRUZ, S. C. S.; BICUDO, S. J. Densidades populacionais de milho em arranjos espaciais convencional e equidistante entre plantas. Ciência Rural, Santa Maria-RS, v. 39, n.8, p. 2334-2339, 2009.

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, 5:89-97, 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento de safra: grãos v.8– Safra 2020/21, n.12 - Décimo segundo levantamento, Brasília, p. 1-97, setembro 2021.
Disponível:Em:<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/39034_3ccad80c555e633d26ed7fb5e9393037>. Acesso em: 30/01/2022.

CORRÊA, T. R. C.; LORENÇONI, R.; DOURADO NETO, D.; SACARPARE, F. V.; VIVIAN, R.; RUIZ, E. T. Aplicações e limitações da modelagem na agricultura – revisão. Revista de Agricultura, Piracicaba, v. 86, n. 1, p. 1-13. 2011.

COSTA, L. C.; BARROS, A. H. C. Desenvolvimento e teste de um modelo de simulação de crescimento, desenvolvimento e rendimento da cultura do milho. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 75-82, 2001.

CRUZ, S. C. S.; SENA-JUNIOR, D. G.; SANTOS, D. M. A.; LUNEZZO, L. O.; MACHADO, C. G. Cultivo de soja sob diferentes densidades de semeadura e arranjos espaciais. Revista de Agricultura Neotropical, v. 3, n. 1, p. 1–6, 2016.

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARD, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modelling and simulation: I. Uses of mathematical models in agricultural science. Scientia Agricola, Piracicaba, v. 55, n. especial, p. 46-50, ago. 1998.

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. Stages of soybean development. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1977. 12 p. (Special Report, 80).

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. D.; ESCOBEDO, J. F.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; ARAÚJO NETO, R. A. D. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 8, p. 798-804, 2014.

FOSTER, T.; BROZOVIĆ, N.; BUTLER, A. P.; NEALE, C. M. U.; RAES, D.; STEDUTO, P.; FERERES, E.; HSIAO, T. C. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. Agricultural Water Management, v. 181, p. 18-22, 2017.

GASSMAN, P. W.; WILLIAMS, J. R.; WANG, X.; SALEH, A.; OSEI, E.; HAUCK, L. M.; IZAURRALDE, R. C.; FLOWERS, J. The Agricultural Policy Environmental EXtender (APEX) Model: An Emerging Tool for Landscape and Watershed Environmental Analyses. CARD Technical Reports, v. 41, p. 1-109, 2009.

HANSEN, S.; JENSEN, H. E.; NIELSEN, N. E.; SVENDSEN, H. Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. Fertilizer research, v. 27, n. 2-3, p. 245-259, 1991.

HE, D.; WANG, E.; WANG, J.; ROBERTSON, M. J. Data requirement for effective calibration of process-based crop models. Agricultural and Forest Meteorology, v. 234, p. 136-148, mar. 2017.

LECERF, R.; CEGLAR, A.; LÓPEZ-LOZANO, R.; VELDE, M. V. D.; BARUTH, B. Assessing the information in crop model and meteorological indicators to forecast crop yield over Europe. Agricultural Systems, v. 168, p. 191-202, 2019.

LINKER, R.; IOSLOVICH, I. 2017. Assimilation of canopy cover and biomass measurements in the crop model AquaCrop. Biosystems engineering 162 57 – 66. 2017.

MABHAUDHIA, T.; MODIA, A. T.; BELETSEB, Y. B. Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (Colocasia esculenta L. Schott) landrace. Agricultural and Forest Meteorology. 192–193, p. 132–139, 2014.

MANCOSU, N.; SPANO, D.; ORANG, M.; SARRESHTEH, S.; SNYDER, R. L. SIMETAW# - a Model for Agricultural Water Demand Planning. Water Resources Management, v. 30, n. 2, p. 541-557, 2016.

MANIRUZZAMAN, M.; TALUKDER, M. S. U.; KHAN, M. H.; BISWAS, J. C.; NEMES, A. Validation of the AquaCrop model for irrigated rice production under varied water regimes in Bangladesh. Agricultural Water Management, v. 159, p. 331-340, set. 2015.

MAUAD, M.; SILVA, T. L. B.; ALMEIDA NETO, A. I.; ABREU, V. G. Influência da densidade de semeadura sobre características agronômicas na cultura da soja. Revista Agrarian, v.3, n.9, p.175-181, 2010.

MELLO, A.; CAIMI, L. L. Simulação na validação de sistemas computacionais para agricultura de precisão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 2008; 12:666-675.

MORAIS, R. B. G.; LYRA, G. B.; SANTOS, L. R.; CAVALCANTE JÚNIOR, C. A.; CARVALHO, A. L.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L. Crescimento e produtividade de milho em diferentes épocas de plantio, nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 16, n. 1, p. 109-119, 2017. DOI: https://doi.org/10.18512/1980-6477/rMS.v16n1p109-119.

NYAKUDYAA, I. W.; STROOSNIJDERB, 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.

PAREDES, P., MELO-ABREU, J. P.; ALVES, I. & PEREIRA, L. S. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. Agriculture Water Management 144, 81–97. 2014.

PAREDES, P.; WEI, Z.; LIU, Y.; XU, D.; XIN, Y.; ZHANG, B.; PEREIRA, L. S. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for soil water,soil evaporation, biomass and yield of soybeans in North China Plain. Agricultural Water Management, v.152, p.57-71. 2015.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA; 1997.

PIRES, J. L. F.; COSTA, J. A.; THOMAS, A. L.; MAEHLER, A. R. Efeito de populações e espaçamentos sobre o potencial de rendimento da soja durante a ontogenia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 35, n. 8, p. 1541–1547, 2000.

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, ed. 3, p.438–447. 2009.

RAES, D.; STEDUTO P.; HSIAO T.C.; FERERES E. Reference Manual. AquaCrop, version 6.0 plus. Chapter 1. FAO crop- water productivity model to simulate yield response to water. March-2017.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. & FERERES, E. AquaCrop 4.0 – The FAO crop model to simulate yield response to water: chapter 3. Roma, FAO, 2012. 125p.

RODRIGUES, W. C. Apostila Estatística Aplicada. 6ª Ed. Revisada e Ampliada, 2008. Disponível em: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/br> Acesso em: 12/02/2020.

SARMENTO, P. L. V. S. Ecofisiologia do milho sob diferentes épocas de semeadura e densidades de plantio: Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Dissertação Mestrado. 2015.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. (Eds.) Soja: do plantio à colheita. 1. ed. Viçosa: Editora UFV, MG, 2015. 333 p.

SENTELHAS, P. C.; FARIA, R. T.; CHAVES, M. O.; HOOGENBOOM, G. Avaliação dos geradores de dados meteorológicos WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais brasileiras, usando modelos de simulação de culturas. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 2001; 9:357-376.

SILVA, V. P. R.; SILVA, R. S.; MACIEL, G. F.; BRAGA, C. C.; SILVA JÚNIOR, J. L. C.; SOUZA, E. P.; ALMEIDA, R. S. R.; 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 Motopiba region, Brazil. Ciência Rural. V. 48, 01, 2018.

SIMIONESEI, L.; RAMOS, T. B.; BRITO, D.; JAUCH, E.; LEITÃO, P. C.; ALMEIDA, C.; NEVES, R. Numerical simulation of soil water dynamics under stationary sprinkler irrigation with mohid-land. Irrigation and Drainage, v. 65, p. 98-111, 2016.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; RAES, D.; FERERES, E. AquaCrop - The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Agronomy Journal, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009.

STRICEVIC S.; COSIC, M.; DJUROVIC, N.; PEJIC, B.; MAKSIMOVIC, L. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. Agricultural Water Management, v.98, p.1615-1621. 2011.

TOJO-SOLER, C. M. Uso do modelo Ceres-Maize para previsão de safra do milho “safrinha”. 132p. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, ESALQ/USP. 2004.

TOJO-SOLER, C.; FOLEGATTI, M.V.; FARIA, R.T. Uso do modelo CERES-Maize para identificação de características genéticas desejáveis e de práticas adequadas de manejo em milho "safrinha” e determinação de práticas adequadas de manejo em condições de risco climático. Revista Brasileira de Agrometeorologia. 2001; 9:339-346.

TOUMI, J.; ER-RAKI S.; EZZAHAR, J.; KHABBA, S.; JARLAN, L.; CHEHBOUNI, A. 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. Agricultural Water Management. 163. 219–235. 2016.

TSAKMAKIS, I. D.; KOKKOS, N. P.; GIKAS, G. D.; PISINARAS, V.; HATZIGIANNAKIS, E.; ARAMPATZIS, G.; SYLAIOS, G. K. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. Agricultural Water Management, v. 213, p. 419-432, 2019.

VANUYTRECHT, E.; RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; VILA, M. G.; MORENO, P. M. AquaCrop: FAO’s crop water productivity and yield response model. Environmental Modelling and Software, v. 62, p. 351-360, dez. 2014.

WHISLER, F. D.; ACOCK, B.; BAKER, D. N.; FYE, R. E.; HODGES, H. F.; LAMBERT, J. R; LEMMON, H. E.; MCKINION, J. M.; REDDY, V. R. Crop simulation models in agronomic systems. Advanced Agronomy. 1986; 40:141-208.

WILLMOTT, C. J. Some components on the evaluation of model performance. Bulletin American Meteorological Society, v. 63, n.11, p.1.309-1.313, 1982.

XIANGXIANG, W.; QUANJIU, W.; JUN, F.; QIUPING, F. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of waterdeficits and different irrigation regimes on the biomass and yield ofwinter wheat grown on China‟s Loess Plateau. Agricultural Water Management, v.129, p. 95-104. 2013.

ZELEKE, K. T.; LUCKETT, D.; COWLEY, R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. Agron J 103:1610–1618. 2011.