

ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DO PIMENTÃO EM DIFERENTES REGIMES
HÍDRICOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Catariny Cabral Aleman

Coorientadores: Gabrielle Ferreira Pires
Paulo Roberto Cecon

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586m
2023 Silva, Adelaide Cristielle Barbosa da, 1993-
Modelagem do crescimento do pimentão em diferentes regimes hídricos / Adelaide Cristielle Barbosa da Silva. – Viçosa, MG, 2023.

1 tese eletrônica (66 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Catariny Cabral Aleman.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.332>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Irrigação agrícola. 2. Pimentão - Irrigação. 3. Métodos de simulação. I. Aleman, Catariny Cabral, 1988-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.587

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552


ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA

**MODELAGEM DO CRESCIMENTO DO PIMENTÃO EM DIFERENTES REGIMES
HÍDRICOS**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 05 de maio de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA
Data: 30/05/2023 16:40:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Adelaide Cristielle Barbosa da Silva
Autora

Documento assinado digitalmente
 CATARINY CABRAL ALEMAN PINA
Data: 30/05/2023 17:35:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Catariny Cabral Aleman
Orientadora

Ao Deus da minha vida, aos meus pais Vanilda e
José Amilton (*in memoriam*) e ao meu irmão
Luíz Fernando, dedico com todo amor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu adorado Deus toda minha gratidão, minha rocha inabalável e meu baluarte.

À minha amada mãe Vanilda por todo apoio, carinho, conselhos e compreensão.

Ao meu amado pai José Amilton, que sempre lutou para dar um futuro melhor aos seus filhos.

Saudades eternas, paizinho. Meus primeiros educadores!

Ao meu querido irmão Luíz Fernando por toda confiança, incentivo, inspiração.

Aos meus amados avós Nelcida (*in memoriam*) e David e a toda minha família pelo carinho, apoio, compreensão e incentivo.

À minha querida orientadora Prof^a Catariny, uma verdadeira mãe acadêmica, por todo tempo dedicado, ensinamentos, confiança e paciência durante toda a orientação. A sua motivação nos inspira!

Aos professores Gabrielle Ferreira Pires e Paulo Roberto Cecon, pelos ensinamentos e pela disponibilidade de coorientação. As suas colaborações fizeram toda a diferença!

Aos funcionários da UFV, em especial ao Sr. José Antônio, da Área de Irrigação e Drenagem, por toda ajuda.

À minha querida estagiária Antonella, melhor aluna do curso de Engenharia Agrícola, obrigada pela amizade, disponibilidade e dedicação no estágio.

A todos os amigos da Engenharia Agrícola e do Centro de Referência em Recursos Hídricos (CRRH), em especial Izabelle, Fernanda, Joslanny, Laylton, Gustavo, Felipe, Júlia, Robson, Jasmine, Alécio, Elis, Vinícius, Matheus, Jeniffer, Tayssa, Milena, Layane e Abílio por toda ajuda, conversas e amizade.

À minha segunda família em Viçosa, a Sociedade São Vicente de Paula, Conferência Nossa Senhora do Rosário, em especial aos meus amigos vicentinos Cristiele, Sandrely, Dona Maria Filomena, Mariana, João Paulo, Daniel, Sr. Carlos Alexandre, Taciano, Luiz Carlos, Hélio, José Geraldo e Dona Tereza por toda amizade e ensinamentos. Por me mostrarem o caminho do amor: a caridade!

Aos professores da pós-graduação e a Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos membros da banca examinadora, agradeço pela colaboração para o aperfeiçoamento deste trabalho.

E a todos que acreditaram e torceram por mim. Meu muito obrigada!

BIOGRAFIA

ADELAIDE CRISTIELLE BARBOSA DA SILVA, filha de José Amilton Pereira da Silva (*in memoriam*) e Vanilda Barbosa de Oliveira Silva, nasceu em Jaíba, MG, no dia 04 de julho de 1993.

Em março de 2012 iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Minas Gerais, concluindo em julho de 2017.

Em agosto de 2017 iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, finalizado em julho de 2019.

Em agosto de 2019, ingressou no Doutorado, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em 05 de maio de 2023.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

SILVA, Adelaide Cristielle Barbosa da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2023. **Modelagem do crescimento do pimentão em diferentes regimes hídricos.** Orientadora: Catariny Cabral Aleman. Coorientadores: Gabrielle Ferreira Pires e Paulo Roberto Cecon.

Os modelos computacionais têm se tornado ferramentas agregadoras ao processo de gestão agrícola, uma vez que fornecem a previsão de safras. Existem diversos softwares que são utilizados na elaboração de modelos agrícolas. O software STELLA pode ser utilizado para a modelagem agrícola. Este apresenta fácil aplicação e processos dinâmicos de interação entre variáveis ambientais, características da cultura e estimativa do balanço hídrico. Todavia, faz-se necessário à validação dos modelos, para que estes representem adequadamente o sistema físico. Partindo deste pressuposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o uso do software STELLA na modelagem da cultura do pimentão, cultivado na Zona da Mata Mineira. Os dados de entrada referentes às variáveis climáticas foram obtidos da estação meteorológica automática localizada na área experimental. O experimento foi realizado na Universidade Federal de Viçosa, em dois ciclos, cujos dados obtidos foram divididos para calibração (1º ciclo) e validação (2º ciclo) do modelo. O primeiro ciclo ocorreu no ano de 2021 e o segundo em 2022, ambos com 98 dias após transplante (DAT). Foi utilizado o delineamento em blocos ao acaso com quatro níveis de reposição hídrica com base na evapotranspiração da cultura e três repetições. Foram analisadas a produção de matéria seca e o índice de área foliar. A concordância entre os modelos experimental e computacional foi verificada pelo teste “t” e índice “d”. Os valores modelados pelo STELLA foram estatisticamente iguais aos valores mensurados e houve concordância entre as técnicas estudadas. A utilização do software STELLA na modelagem da cultura do pimentão foi útil na simulação das características biométricas da planta e na estimativa do índice de área foliar.

Palavras-chave: Irrigação deficitária. Manejo de Irrigação. Modelos de simulação.

ABSTRACT

SILVA, Adelaide Cristielle Barbosa da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May 2023. **Modeling of bell pepper growth under different water regimes.** Adviser: Catariny Cabral Aleman. Co-advisers: Gabrielle Ferreira Pires and Paulo Roberto Cecon.

Computational models have become aggregating tools in the agricultural management process, as they provide crop forecasts. There are several software that are used in the elaboration of agricultural models. STELLA software can be used for agricultural modeling. This presents easy application and dynamic processes of interaction between environmental variables, crop characteristics and water balance estimation. However, it is necessary to validate the models, so that they adequately represent the physical system. Based on this assumption, the objective of this research was to evaluate the use of the STELLA software in the modeling of the pepper crop, cultivated in the Zona da Mata Mineira. The input data referring to the climatic variables were obtained from the automatic meteorological station located in the experimental area. The experiment was carried out at the Federal University of Viçosa, in two cycles, whose data obtained were divided for calibration (1st cycle) and validation (2nd cycle) of the model. The first cycle occurred in 2021 and the second in 2022, both with 98 days after transplantation (DAT). A randomized block design with four levels of water replacement based on crop evapotranspiration and three replications was used. Dry matter production and leaf area index were analyzed. The agreement between the experimental and computational models was verified by the “t” test and “d” index. The values modeled by STELLA were statistically equal to the measured values and there was agreement between the studied techniques. The use of STELLA software in the modeling of the pepper crop was useful in simulating the biometric characteristics of the plant and in estimating the leaf area index.

Keywords: Deficit Irrigation. Irrigation Management. Simulation models.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CC	Capacidade de campo (g/g)
CO ₂	Dióxido de carbono
Coef Dr	Coeficiente de drenagem
CoefPP	Coeficiente de precipitação
CRA	Capacidade real de água no solo
CTA	Capacidade total de água no solo
Delta	Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C ⁻¹)
Dr	Inverso da distância relativa Terra-Sol
Ds	Densidade do solo (g cm ⁻³)
Dsolar rad	Declinação solar
ea	Pressão parcial de vapor (kPa)
es	Pressão de vapor de saturação (kPa)
ET0	Evapotranspiração de referência (mm d ⁻¹)
ETc	Evapotranspiração da cultura (mm d ⁻¹)
FH2O	Fator disponibilidade hídrica
FT	Fator temperatura
G	Densidade de fluxo de calor do solo (MJ m ⁻² d ⁻¹)
GD	Graus dias
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K	Coeficiente de extinção da luz do dossel
Kc	Coeficiente da cultura
KL	Coeficiente de irrigação localizada
Ks	Coeficiente de estresse hídrico
KPAR	Coeficiente de interceptação da radiação solar incidente
LAI	Índice de área foliar
MG	Minas Gerais
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa
Pe	Precipitação efetiva
PMP	Ponto de murcha permanente
Ra	Radiação solar extraterrestre (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Rn	Saldo de radiação à superfície (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Rnl	Radiação de ondas longas (MJ m ⁻² d ⁻¹)

Rns	Radiação de ondas curtas (MJ m^{-2})
Rs	Radiação solar incidente (MJ m^{-2})
Rso	Radiação solar de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
RUE	Eficiência no uso da radiação (g MJ^{-1})
STELLA Systems Thinking for Education and Research	
TAS	Teor de água no solo
Tb	Temperatura base ($^{\circ} \text{C}$)
Tmax	Temperatura máxima ($^{\circ} \text{C}$)
Tmed	Temperatura média ($^{\circ} \text{C}$)
Tmin	Temperatura mínima ($^{\circ} \text{C}$)
u2	Velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1})
ws	Ângulo horário de pôr-do-sol
Z	Profundidade da zona radicular
γ	Coefficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ} \text{C}^{-1}$)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
OBJETIVOS.....	16
Objetivo Geral	16
Objetivos Específicos	16
DESENVOLVIMENTO DA TESE	17
CAPÍTULO 1	18
RESUMO	18
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.1 Área Experimental	20
2.2 Organização do modelo	23
2.2.1. <i>Sub-rotinas e processos</i>	23
2.3 Parametrização do modelo.....	27
2.3.1 <i>Calibração e validação</i>	27
2.4 Análise estatística	28
3. RESULTADOS	29
3.1 Análise do Balanço Hídrico	29
3.2 Partição da biomassa.....	32
3.3 Comparação entre os modelos STELLA e Experimental.....	34
3.4 Capacidade preditiva do modelo	39
4. DISCUSSÃO	39
5. CONCLUSÕES	42
6. REFERÊNCIAS	42
CAPÍTULO 2	45
RESUMO	45
ABSTRACT	45
1. INTRODUÇÃO.....	46
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	47
2.1 Características do experimento.....	47
2.2 Desenvolvimento do modelo	49

2.2.1. Descrição das sub-rotinas.....	49
2.3 Calibração e validação dos dados	54
2.4 Análise estatística	54
3. RESULTADOS	55
3.1 Soma térmica ou Graus dias acumulados	55
3.2 Análise foliar	56
3.3 Comparação entre os modelos STELLA e experimental.....	58
4. DISCUSSÃO	60
5. CONCLUSÕES	62
6. REFERÊNCIAS	62
CONCLUSÕES GERAIS	64
REFERÊNCIAS	65

INTRODUÇÃO GERAL

A restrição hídrica é um fator ambiental adverso que provoca um impacto significativo na taxa transpiratória, no potencial de água nas folhas, no potencial hídrico e na atividade fotossintética. Isso se deve ao fechamento estomático (para evitar a perda de água) e redução da disponibilidade de CO₂, podendo comprometer o metabolismo da planta (KOLENC et al., 2016).

De acordo com Kolenc et al. (2016), a restrição na taxa fotossintética ocasiona uma redução da expansão foliar, senescência prematura de folhas e associado a isso observa-se uma atenuação na produção agrícola.

Entretanto, Abd El Baki et al. (2018) afirmam que a irrigação por déficit controlado além de melhorar a gestão da água na agricultura irrigada, pode favorecer positivamente a produtividade da cultura. Por ser um método eficiente na redução de água para irrigação, pode maximizar a eficiência no uso da água.

Assim, Abd El Baki et al. (2018) desenvolveram um modelo numérico de resposta das culturas à irrigação, utilizando a cultura da batata-doce. O modelo foi baseado na receita líquida virtual em função da transpiração acumulada em cada intervalo de irrigação. Os resultados obtidos com este estudo demonstraram um aumento no rendimento de 25%, com uma redução de 18% menos de água aplicada na irrigação quando comparado ao sistema não otimizado (ABD EL BAKI et al., 2018).

Colak (2021) estudaram o efeito da irrigação por déficit controlado no desenvolvimento do pimentão cultivado no Mediterrâneo. O estado hídrico da cultura foi estimado a partir do potencial hídrico foliar. A irrigação por déficit controlado contribuiu para a produção sustentável do pimentão, uma vez que se obteve os mesmos rendimentos quando comparados com a irrigação total (sem redução da necessidade hídrica).

Outro estudo com irrigação por déficit controlado para a cultura do pimentão foi realizado na Jordânia. Shammout et al. (2018) avaliaram três níveis de irrigação baseado na evapotranspiração da cultura: 100%, 80% e 60% da evapotranspiração da cultura (ETc) usando tanque classe A. A irrigação por déficit controlado forneceu uma maior produtividade de água e eficiência no uso da água de irrigação, com menor consumo de água sem danos ao rendimento do pimentão.

No entanto, dentre as espécies hortícolas, o pimentão é considerado uma das mais suscetíveis ao estresse hídrico (COLAK, 2021), principalmente no estágio de floração

(YAHAYA et al, 2012). Devido sua alta condutância estomática, consequência de sua extensa área de superfície foliar transpirante (ABAYOMI et al., 2012).

Como alternativa para avaliar o rendimento da cultura sob uma infinidade de situações, é empregado a dinâmica de modelos computacionais. A partir dos modelos de simulação é possível abordar diversos fatores abióticos e bióticos cujas plantas estão submetidas, como a influência da temperatura no ciclo (graus-dias) assim como a necessidade de irrigação (FERNEDA et al., 2016).

A prática da irrigação é uma técnica que visa suprir a demanda hídrica das culturas. Segundo Shammout et al. (2018), a gestão da irrigação num cenário mundial de escassez hídrica deve ser realizada de maneira eficiente, com o objetivo de maximizar a produtividade das culturas. Assim, aliado ao planejamento e gestão agrícola, o manejo de irrigação é uma técnica que pode ser empregada nos modelos de simulação de culturas.

Parizi et al. (2016) reforça que o desenvolvimento de modelos de simulação possibilita compreender a óptica de um sistema biológico qualquer sob diversas situações, visando facilitar a tomada de decisão a partir da representação da realidade. Em consequência disso, é possível simular uma infinidade de cenários estimando, por exemplo, a resposta da planta a diferentes regimes hídricos na produção agrícola, de modo a auxiliar no planejamento da atividade (PARIZI et al., 2016).

No entanto, a falta de dados experimentais representativos e a dificuldade na compreensão dos processos biofísicos que ocorrem no ciclo cultural, associados às condições ambientais e ao manejo a qual a cultura está submetida, são as principais causas de oscilações na adequação dos modelos de cultura (SILVA; OLIVEIRA; BRAGA, 2023). Assim, a validação de um modelo para determinada área, nas condições ambientais em que a cultura está exposta, é fundamental para a adequação do sistema dinâmico à realidade (TAO et al., 2018).

Leary et al. (2015) destacam a necessidade de dados experimentais para corrigir as discrepâncias nos modelos de rendimento de trigo em ambiente semiárido, influenciados pela irrigação. Ouyang et al. (2014), utilizando o software STELLA para simulação da dinâmica de água e nitrogênio na cultura do eucalipto, observaram que o modelo desenvolvido a partir do STELLA é útil na estimativa da produção de eucalipto.

Existem também outros modelos para simulação de culturas, como é o caso do AquaCrop. Esse modelo é capaz de determinar a produtividade e a eficiência do uso da água das culturas. Entretanto, a simulação com o AquaCrop não foi calibrada e validada para todas as culturas (FOSTER et al., 2017). De modo que, as principais culturas simuladas e apresentadas na literatura utilizando esse modelo são a batata, o tomate, a cana-de-açúcar, o

algodão, o milho e o açafrão (MONTROYA et al., 2016; AKUMAGA et al., 2017; BAUMHARDT et al., 2009; MIRSAFI et al., 2016; KATERJI et al. 2013).

Além disso, o AquaCrop não modela o particionamento da matéria seca para os diferentes órgãos da planta. Também não relaciona o índice de área foliar, simplificando a cobertura do dossel em fração ou porcentagem (FREITAS, 2017).

Ademais, os modelos realizados para a cultura do pimentão foram realizados em estufa (SHAMMOUT et al., 2018), em que os resultados obtidos em ambiente protegido nem sempre são condizentes com a realidade (FODOR et al., 2017). Portanto, a modelagem da cultura do pimentão submetido a diferentes regimes hídricos é pouco estudada, sendo necessários mais estudos para auxiliar no manejo cultural e hídrico.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo principal da pesquisa foi construir e validar um modelo de crescimento do pimentão considerando diferentes lâminas de irrigação, baseado na dinâmica de sistemas aplicada a partir do software STELLA.

Objetivos Específicos

- I. Construir um modelo para previsão da matéria seca da planta, índice de área foliar baseado no acúmulo de graus-dias.
- II. Calibração da eficiência do uso da radiação e do coeficiente de extinção de luz do dossel.
- III. Validar o modelo para a cultura do pimentão a partir dos dados coletados em campo.
- IV. Comparar a resposta da cultura para as diferentes lâminas irrigadas: 25, 50, 75 e 100 % da evapotranspiração da cultura.
- V. Determinar o teor de água no solo a partir da construção da sub-rotina Balanço Hídrico.
- VI. Avaliar se existem alterações nos componentes morfológicos das plantas, considerando as diferentes lâminas irrigadas.

- VII. Avaliar se a simulação da produção de matéria seca é semelhante aos valores mensurados em campo.
- VIII. Avaliar se o modelo matemático desenvolvido simula com exatidão o índice de área foliar da planta.

DESENVOLVIMENTO DA TESE

No primeiro capítulo da pesquisa intitulado: “Previsão do rendimento da cultura do pimentão submetido a diferentes regimes hídricos” é apresentado um modelo computacional que visa estimar o crescimento e a produtividade do pimentão (*Capsicum annuum L.*) sob diferentes lâminas irrigadas: 25, 50, 75 e 100 % da evapotranspiração da cultura, por meio do efeito simulado dinamicamente, para posterior validação dos resultados. Além disso, é necessário avaliar se a produção de matéria seca simulada é semelhante aos valores mensurados em campo.

No segundo capítulo intitulado: “Simulação dos graus dias e influência do índice de área foliar no desenvolvimento do pimentão” é abordado a modelagem fenológica da cultura baseada no tempo térmico (graus dias). Foi necessário avaliar se existem alterações nos componentes morfológicos das plantas, em função das diferentes lâminas irrigadas. Assim como, identificar como e em que extensão tais componentes mensurados diferem dos resultados simulados.

CAPÍTULO 1

Estimativa do rendimento da cultura do pimentão submetido a diferentes regimes hídricos

RESUMO

O balanço hídrico é uma técnica utilizada no monitoramento da água no solo. É fundamental para o manejo de irrigação, uma vez que realizado de forma adequada possibilita um aumento significativo na produtividade das culturas. Associado às metodologias de manejo, a modelagem matemática das culturas é uma prática que vem se destacando no setor agrícola. O uso de softwares computacionais para modelagem permite estimar a produção agrícola baseada em variáveis edafoclimáticas, considerando diferentes escalas temporais e espaciais. Assim, o objetivo neste estudo foi avaliar, calibrar e validar o modelo construído pelo software STELLA para estimar o rendimento da cultura do pimentão irrigado por gotejamento. Foi construído um modelo computacional a partir de equações matemáticas para simular informações observadas em campo. Os dados de entrada do modelo foram coletados de uma estação meteorológica automática localizada na área experimental. Foram consideradas as informações de temperatura, precipitação, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar. O modelo desenvolvido a partir do software STELLA foi testado e validado a partir das informações de dois anos de cultivo, 2021 e 2022. As equações do modelo foram desenvolvidas a partir da metodologia de superfície de resposta. A concordância entre os modelos experimental e computacional foi verificada pelo teste “t” e pelo índice “d”. Os resultados do estudo indicam uma aplicabilidade do algoritmo STELLA na estimativa da produtividade da cultura do pimentão.

Palavras-chave: *Capsicum annuum* L. Irrigação. Modelos de evapotranspiração.

Yield prediction of bell pepper under different water regimes

ABSTRACT

Water balance is a technique used to monitor soil water. It is fundamental for the management of irrigation, since if carried out properly, it allows a significant increase in crop productivity.

Associated with management methodologies, the mathematical modeling of crops is a practice that has been gaining prominence in the agricultural sector. The use of computer software for modeling allows estimating agricultural production based on edaphoclimatic variables, considering different temporal and spatial scales. Thus, the objective of this study was to evaluate, calibrate and validate the model built by the STELLA software to estimate the yield of the drip-irrigated pepper crop. A computational model was built from mathematical equations to simulate information observed in the field. The model input data were collected from an automatic meteorological station located in the experimental area. Information on temperature, precipitation, wind speed, relative humidity and solar radiation were considered. The model developed using the STELLA software was tested and validated based on information from two years of cultivation, 2021 and 2022. The model equations were developed based on the response surface methodology. The agreement between the experimental and computational models was verified by the “t” test and the “d” index. The results of the study indicate the applicability of the STELLA algorithm in estimating the productivity of the sweet pepper crop.

Keywords: *Capsicum annuum* L. Irrigation. Evapotranspiration models.

1. INTRODUÇÃO

O pimentão é uma planta perene de relevância econômica, originária da América Latina Central. Entretanto, é amplamente produzido em todo o mundo (ZHANG, et al. 2019). Os frutos do pimentão podem apresentar cores distintas, entre os mais conhecidos têm-se o pimentão verde, vermelho e amarelo. É muito utilizado na culinária mundial e ainda, é rico em minerais e vitamina C (SHARMA; SRIVASTAVA; MANGAL, 2020).

O pimentão pode ser produzido durante o ano todo. É uma hortaliça adaptável às condições do semiárido. Entretanto, o melhor desenvolvimento da cultura se dá em clima ameno e seco, com o uso da irrigação. Possui uma rentabilidade positiva atrelada ao alto custo de produção, demandando assim uma excelente gestão agrícola (HFBRASIL, 2017).

Em decorrência da irregularidade de precipitações ao longo do ano, faz-se necessário a adoção de práticas de manejo de água para o cultivo de plantas. O manejo da irrigação é uma técnica de gestão que prioriza o uso racional e conseqüentemente, potencializa a eficiência do uso da água quando realizada de maneira adequada. A irrigação com déficit controlado é uma estratégia amplamente utilizada no manejo de irrigação (ROCHA, 2017).

O balanço hídrico é uma das principais ferramentas responsáveis para que a gestão hídrica seja eficiente (ROCHA, 2017). As inadequações na reposição de água no solo inviabilizam a produção, impactando diretamente na produtividade (MALDONADO, 2015). Além de que, a falta de estudos a respeito do pimentão é também considerada um fator limitante de produção (HFBRASIL, 2017).

Para auxiliar no planejamento agrícola e na gestão produtiva é comum a utilização de modelos de simulação. A partir desses modelos é possível estimar a produção das culturas, uma vez que estes representam a realidade com base na dinâmica de sistemas (PARIZI et al, 2016).

Existem alguns modelos computacionais que têm a função de auxiliar na tomada de decisões, como o AquaCrop, o APSIM e o Ceres (SOUZA et al., 2020a). Entretanto, a simplificação demasiada dos processos físicos, a complexidade destes modelos e a falta de dados experimentais para validação constituem um empecilho para a sua utilização como ferramenta de gestão (ARCHONTOULIS, 2020).

O software STELLA é uma ferramenta computacional simples, possibilitando que o usuário modifique facilmente a operação e a estrutura do modelo com o intuito de atender a um requisito específico da simulação (POULOSE; KUMAR; GANJEGUNTE, 2021). A partir da dinâmica de sistemas é possível simular as alterações que ocorrem no solo e na planta, como o teor de umidade do solo e o crescimento da planta (HANNON; RUTH, 2014).

A proposição de cenários no modelo desenvolvido pelo STELLA tem a função de representar a realidade. Estes cenários estão interconectados entre si, com o intuito de descrever e simplificar o processo solo-planta-atmosfera (OUYANG et al., 2021). O modelo computacional desenvolvido pelo software é diretamente influenciado pela dinâmica de água no solo e pode ser facilmente interpretável pelos usuários (POULOSE; KUMAR; GANJEGUNTE, 2021).

Partindo dessa premissa, o objetivo neste trabalho foi construir um modelo de simulação para a cultura do pimentão, considerando diferentes lâminas irrigadas a partir do software STELLA como ferramenta de apoio à tomada de decisão e gestão agrícola.

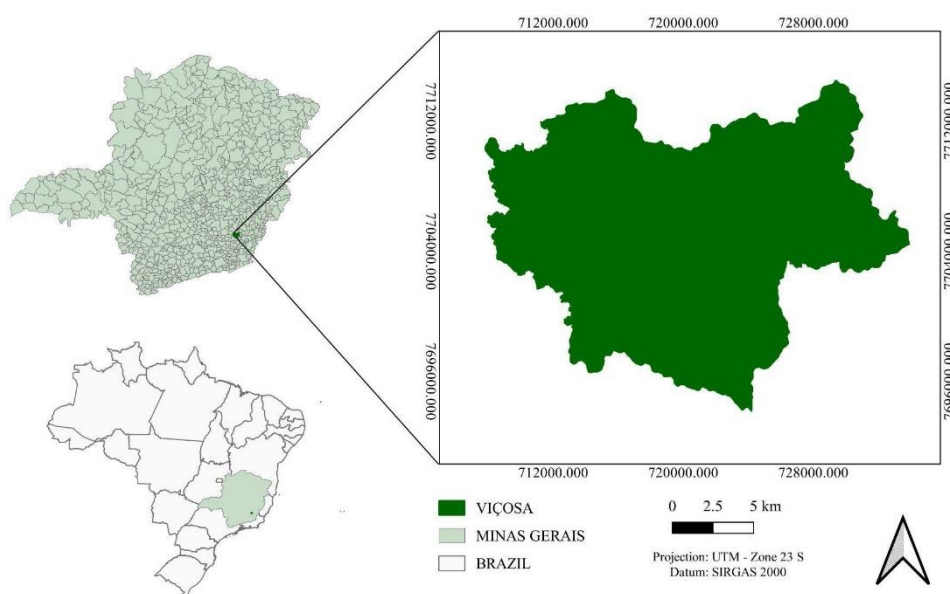
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área Experimental

O experimento foi conduzido na Área Experimental do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Município de Viçosa, Estado de

Minas Gerais, Brasil (Figura 1). A cultura do pimentão foi implantada nos anos de 2021 e 2022, correspondendo a dois ciclos. O primeiro ciclo foi utilizado para calibrar o modelo. As coordenadas geográficas do local são 20° 45' 45.4"S e 42°51' 50.5"O, possuindo uma altitude média de 698 m.

Figura 1 - Localização do Município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Autora (2023).

Foram realizadas análises físico-químicas da área experimental e o preparo de solo para o plantio das mudas, cuja densidade foi de 66.667 plantas ha⁻¹ (0,3 m entre plantas e 0,5 m entre fileiras de plantas). A condução do experimento seguiu o esquema de parcela subdividida, tendo nas parcelas o fator tempo (19, 26, 33, 41, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91 e 98 DAT) e nas subparcelas as lâminas irrigadas (25 %, 50%, 75% e 100% ET_c) no delineamento em blocos ao acaso, com três repetições.

A adubação foi realizada seguindo a recomendação de Ribeiro, Guimarães e V. Alvarez (1999). Utilizou-se o sistema de irrigação por gotejamento com vazão do gotejador de 1,47 L/h, espaçamento entre gotejadores de 0,3 m e entrelinhas de 0,5 m. A intensidade de aplicação do sistema foi de 9,8 mm/h e a partir desse valor determinou-se o tempo de funcionamento do

sistema de irrigação. O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) obtido em condições de campo foi de 96%.

A aplicação da irrigação foi baseada no turno de rega diário, quando não ocorria precipitação pluviométrica. A quantidade de água necessária a irrigar foi baseada na reposição diária da evapotranspiração da cultura. O teor de água do solo foi monitorado semanalmente pelo método gravimétrico.

As características químicas no solo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm antes da instalação do experimento estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características químicas do solo antes da implantação do experimento.

Prof.	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	P-Rem
cm	H ₂ O	---mg dm ⁻³ ---		-----cmolc dm ⁻³ -----				mg L ⁻¹
0-20	6,13	31,7	190	3,58	0,82	0,00	4,3	32,2
20-40	5,72	28,1	111	3,23	0,77	0,00	3,2	31,4
40-60	5,52	22,5	107	2,82	0,68	0,00	2,9	23,7

* Extração com solução de Mehlich-1. Prof. – Profundidade de solo.

Fonte: Autora (2023).

As características físicas do solo em que foi cultivado o pimentão estão apresentadas na Tabela 2, de acordo com os valores encontrados por Souza et al. (2020b). Foram assumidos os valores médios de cada parâmetro da tabela, como valor único para representar o perfil do solo, para o cálculo do balanço hídrico.

Tabela 2 - Características físicas da área experimental.

Profundidade do solo (cm)	Medida Souza et al. (2020b)				
	Ds (g/cm ³)	Θ _{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ _{pm} (cm ³ cm ⁻³)	Θ _{cc} (g g ⁻¹)	Θ _{pm} (g g ⁻¹)
0-20	1,44	0,46	0,25	0,32	0,17
20-40	1,49	0,51	0,26	0,34	0,17
40-60	1,50	-	-	-	-
Média	1,47	0,485	0,255	0,33	0,17

Ds - Densidade do solo, Θ_{cc} - capacidade de campo (-30kPa) e Θ_{pm} - ponto de murcha permanente (- 1500kPa).

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2020b).

2.2 Organização do modelo

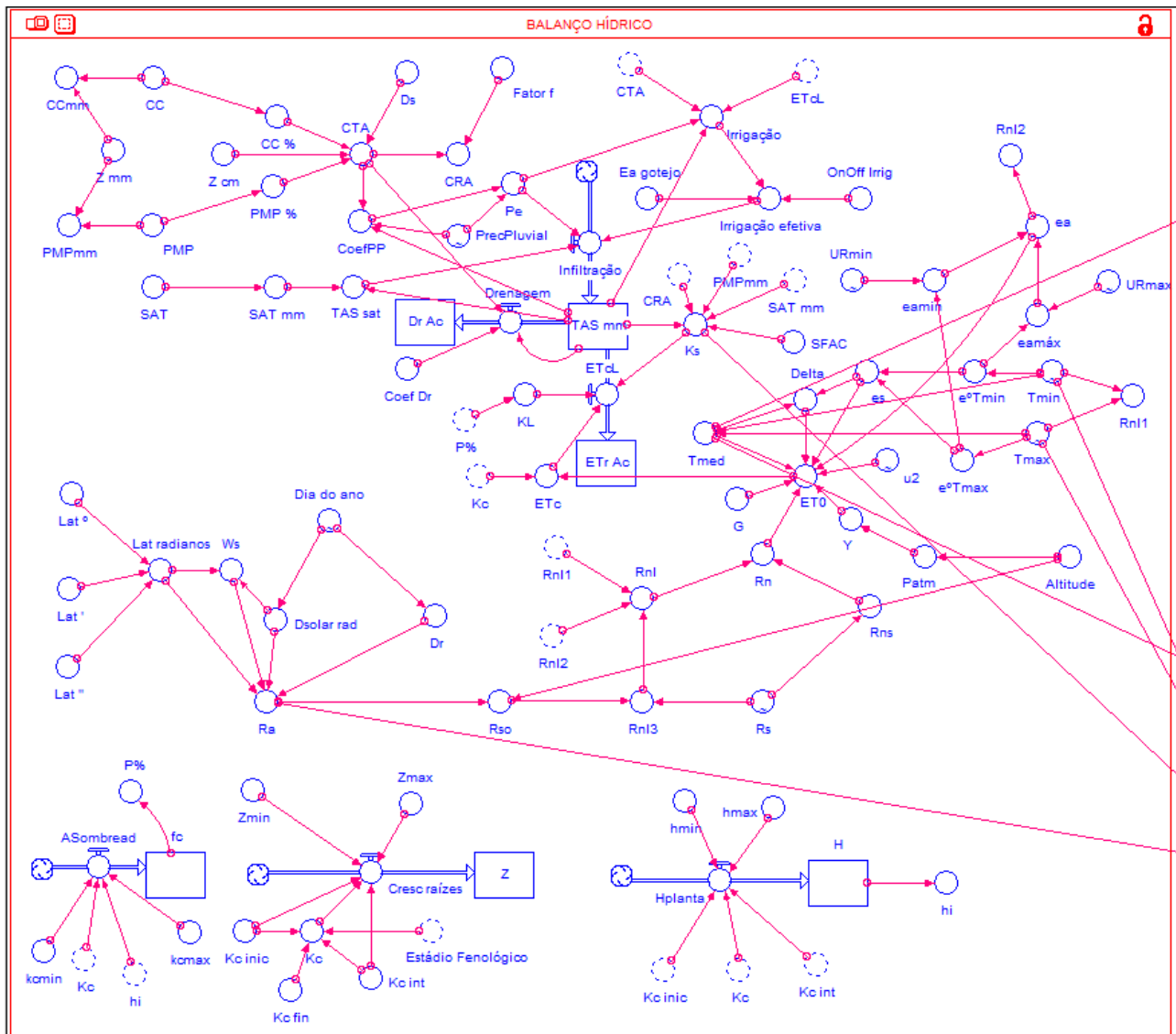
O modelo foi desenvolvido utilizando o software STELLA 8.0 (ISEE SYSTEMS, 2023), a partir da inserção de parâmetros pré-estabelecidos e formulação matemática dos processos que envolvem o crescimento cultural, o balanço hídrico e a produção de matéria seca da planta. Com o intuito de descrever a dinâmica do sistema através de um conjunto de elementos que caracterizam os fenômenos relacionados a evapotranspiração, demanda hídrica, fenologia da planta e partição e acumulação de matéria seca.

Para isso foi necessário estabelecer sub-rotinas caracterizando separadamente cada um destes fenômenos, inter-relacionados entre si no sistema como um todo. Por exemplo, o conteúdo de água no solo que está associado ao processo da demanda hídrica (uma sub-rotina) afeta a produção de matéria seca (outra sub-rotina). Apesar de que a descrição elaborada de todas as sub-rotinas esteja além do escopo deste artigo, serão descritas as sub-rotinas que caracterizam as relações água-solo-planta-atmosfera (balanço hídrico) e produção de matéria seca.

2.2.1. Sub-rotinas e processos

Na sub-rotina Balanço Hídrico foram inseridas informações referentes às condições do solo, do clima e da cultura. Para caracterizar a disponibilidade de água no solo estabelecida pelo balanço de entrada e saída de água no solo (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma da sub-rotina “Balanço Hídrico” no software STELLA



Fonte: Autora (2023).

A partir da Figura 2 é possível observar a dinâmica de fluxo de água no solo. A infiltração ocorre quando o teor de água do solo for inferior a umidade de saturação, sendo esta condição assumida para o fluxo de entrada de água. O excesso de água é drenado, sendo este referente ao conteúdo de água superior a umidade da capacidade de campo. As variáveis de entrada e equações utilizadas na construção desta sub-rotina estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Equações da sub-rotina Balanço Hídrico.

Descrição	Equação	
Capacidade total de água no solo (mm)	$CTA = \left[\frac{CC - PMP}{10} \right] D_s Z$	(1)
Capacidade real de água no solo (mm)	$CRA = CTA \times f$	(2)
Evapotranspiração de referência (mm d ⁻¹)	$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$	(3)
Evapotranspiração da cultura (mm d ⁻¹)	$ETc = ET_0 \times K_c \times K_s \times K_L$	(4)
Coefficiente da cultura estágio II	$K_{c2} = \frac{0,66}{31} \times T + 0,024$	(5)
Coefficiente da cultura estágio IV	$K_{c4} = -\frac{0,20}{27} \times T + 1,62$	(6)
Coefficiente de estresse hídrico	$K_s = \frac{(TAS + 1)}{(CTA + 1)}$	(7)
Precipitação efetiva	$Pe = Pp \times cp$	(8)
Irrigação efetiva	$IRE = Ir \times Ea$	(9)
Teor de água no solo	$TAS = LAA_{i-1} + (Pe + Ir - Dr - ETc)$	(10)

CC - capacidade de campo (%); PMP - ponto de murcha permanente (%); D_s - densidade do solo (g cm⁻³); R_n - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m⁻² d⁻¹); G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m⁻² d⁻¹); T - temperatura do ar a 2 m de altura (°C); u₂ - velocidade de vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s - pressão de vapor de saturação (kPa); e_a - pressão parcial de vapor (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C⁻¹); γ - coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹); K_c - coeficiente da cultura; LAA_{i-1} - lâmina de água no solo; T - Tempo (dias); P_p - Precipitação pluvial (mm); c_p - Coeficiente de precipitação; I_r - Lâmina irrigada (mm); E_a - Eficiência de aplicação; D_r - Drenagem profunda (mm); K_L - Coeficiente de irrigação localizada.

Fonte: Autora (2023).

Quando o K_s for igual a 1 significa que a evapotranspiração da cultura é mantida em sua potencialidade. Nessa condição assume-se que o solo se encontra na capacidade de campo. Com o decorrer do tempo, à medida que o solo vai perdendo umidade (k_s<1), esse valor diminuirá até que seja necessário realizar a reposição hídrica, estabelecendo novamente a umidade na capacidade de campo.

Para fins de cálculos da demanda hídrica, foram utilizados os valores médios do coeficiente de cultura do pimentão para cada estágio fenológico, com base nos valores encontrados na literatura, apresentados na Tabela 4.

Os valores adotados para as características físicas do solo: capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), os quais foram utilizados como dados de entrada na sub-

rotina Balanço Hídrico, com base nos valores encontrados por Souza et al. (2020b), para o solo da mesma área experimental no qual foi cultivado o pimentão estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente da cultura (K_c) do Pimentão para as fases de desenvolvimento

Estádio	K_c				Valores adotados
	Allen et al. (1998)	De Souza et al. (2011)	Da Silva Albuquerque et al. (2012)	Silva et al. (2017)	
K_{c1}	0,30 - 0,40	0,32 - 0,34	0,30 - 0,40	-	0,35
K_{c2}	0,60 - 0,75	-	0,60 - 0,75	0,81	-
K_{c3}	0,95 - 1,10	1,18 - 1,05	0,95 - 1,10	1,05	1,05
K_{c4}	0,81	0,77 - 0,86	0,81	-	-

Fonte: Adaptado de Allen et al. (1998); De Souza et al. (2011); Da Silva Albuquerque et al. (2012); Silva et al. (2017).

O coeficiente de cultura para os períodos em que este não é constante, foi determinado de acordo com os valores médios das durações de cada estágio de desenvolvimento (Equações 5 e 6). Para o fator de disponibilidade de água no solo “ f ” em função do grupo de culturas foi adotado o valor descrito por Bernardo, Mantovani, Silva e Soares et al. (2019).

Na partição da matéria seca da planta foram considerados a matéria seca dos tecidos vegetais, sendo estes as folhas, caules, raízes e frutos. Para cada um destes componentes foram adotados diferentes coeficientes de partição conforme cada estágio fenológico (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores de coeficientes de partição dos órgãos da planta, STELLA.

Componentes da planta	Coeficientes de partição			
	Juvenil	Vegetativo	Reprodutivo	Maturação
Folha	0,55	0,46	0,05	0,05
Caule	0,30	0,40	0,05	0,05
Raiz	0,15	0,14	0,04	0,05
Fruto	0	0	0,86	0,85

Fonte: Autora (2023).

A matéria seca dos componentes da planta está diretamente relacionada com seu crescimento e desenvolvimento dentro do ciclo, assumindo valores distintos conforme o órgão da planta.

A partição da matéria seca caracteriza esse processo de diferenciação no crescimento, visto que esta é determinada por coeficientes que variam de acordo com o período fenológico. Assim, para determinar tais coeficientes de partição apresentados pela Tabela 5, foram realizadas calibrações do modelo com dados experimentais.

2.3 Parametrização do modelo

2.3.1 Calibração e validação

No processo de calibração do modelo foi necessário separar um conjunto de dados diferente do conjunto de dados utilizados na validação do modelo. Para o uso amplo dos parâmetros do modelo, os experimentos foram comparados com o cenário ótimo, sob condições de crescimento potencial sem restrição hídrica.

Na análise de crescimento foram realizadas três amostragens a partir de coletas destrutivas, com dozes avaliações no tempo, iniciando aos 19 DAT até os 98 DAT durante os estádios fenológicos da cultura, sendo avaliadas 12 plantas a cada amostragem totalizando os quatro tratamentos.

O particionamento dos carboidratos para os diferentes órgãos da planta foi determinado a partir de coeficientes de partição. Os coeficientes de partição: CoefParFo, CoefParCa, CoefParFr e CoefParRa, para as folhas, caules, frutos e raízes, respectivamente, foram ajustados e parametrizados com base nos valores da massa seca medidos em campo. Esses valores foram obtidos a partir de um conjunto de dados de matéria seca acumulada para cada órgão específico da planta (como as folhas, por exemplo) *versus* a matéria seca total acumulada, no período compreendido entre os estádios fenológicos.

A calibração dos coeficientes de partição foi finalizada quando as diferenças entre a matéria seca observada em campo e simulado foram mínimas, satisfazendo os critérios de convergência pré-determinados, ou seja, quando houve um bom ajuste do modelo aos dados mensurados.

Para cada componente vegetativo foi mensurada separadamente a matéria seca por meio de secagem em estufa a 75 ° C, durante 72 horas, à exceção dos frutos, cujo tempo foi de 96

horas. A matéria seca total da planta foi obtida pelo somatório da matéria seca das folhas, caules, raízes e frutos.

2.4 Análise estatística

Os dados foram analisados por meio da metodologia de superfície de resposta. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, tendo sido utilizado o teste de Student (teste “t”) com nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação (r^2) e no comportamento do fenômeno em estudo.

Para comparar os modelos ajustados ao modelo computacional foi utilizado o teste “t”, para testar as hipóteses: $H_0: \beta_1 = 1$ versus $H_a: \beta_1 \neq 1$ de acordo com o modelo a seguir:

$$Y_i = \beta_1 X_i + e_i \quad (11)$$

Sendo as variáveis X_i e Y_i , no modelo de regressão linear simples, descritas como os valores previstos nos modelos de regressão que serão comparados. A estatística do teste “t” para analisar a concordância entre estes modelos é dada pela equação abaixo:

$$t_{cal} = \frac{\widehat{\beta}_1 - 1}{\sqrt{\frac{Q.M.R.}{\sum_{i=1}^n X_i^2}}} \sim t_{(n-1)} \quad (12)$$

em que:

t_{cal} - segue a distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade;

$\widehat{\beta}_1$ - é a estimativa do coeficiente angular da regressão linear simples;

Q.M.R. - é o quadrado médio do resíduo da análise de variância da regressão;

X^2 - é a soma dos quadrados dos valores observados;

n - é o número de observações;

Desta forma, a condição do resultado não significativo do teste indica que os modelos estimam os mesmos valores. No caso de rejeição da hipótese de nulidade (H_0) será previsto que a resposta entre os dois modelos de regressão seja diferente.

Outra metodologia que será utilizada para comparação dos modelos é o índice “d” (WILLMOTT et al., 1985), descrito por índice de concordância ou ajuste entre modelos (Equação 13).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{Y}|) + (|X_i - \bar{X}|)]^2} \quad (13)$$

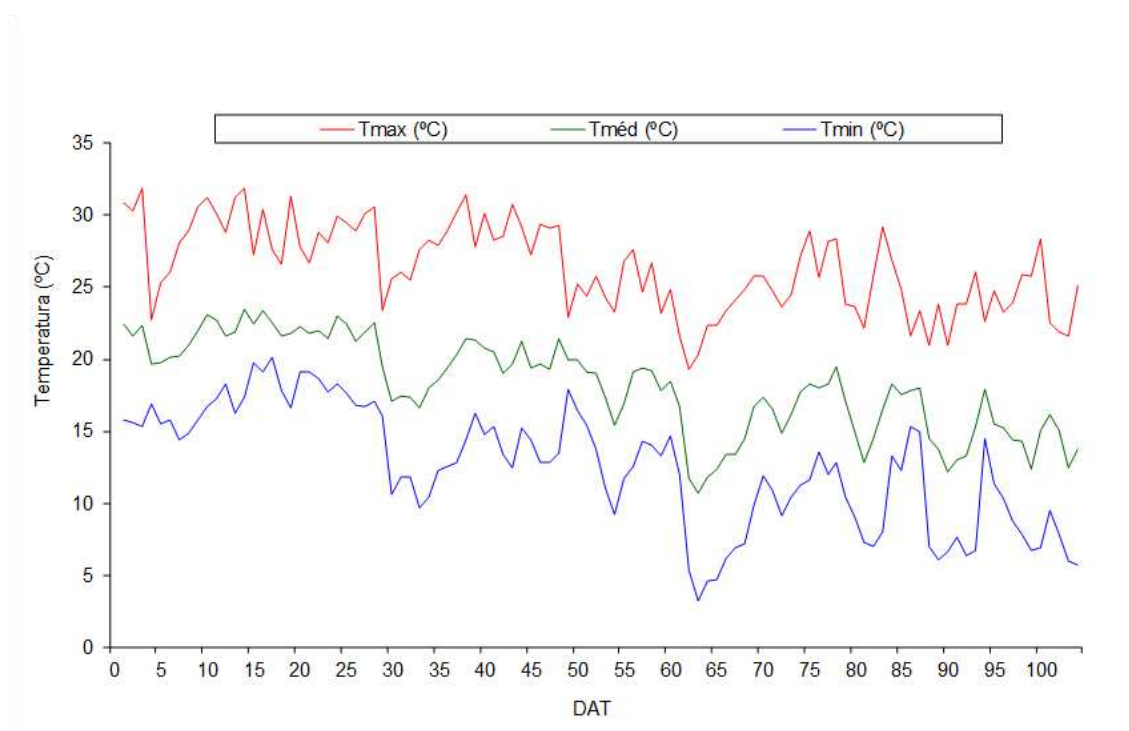
Em que Y_i e X_i assumiram os valores previstos nos modelos de regressão que serão comparados. O valor do índice d pode variar entre 0 e 1. Para “ d ” igual a 1, os modelos são concordantes.

3. RESULTADOS

3.1 Análise do Balanço Hídrico

Na Figura 3 estão apresentadas as variações das temperaturas máxima, média e mínima ao longo do ciclo de cultivo referente ao ano de 2022.

Figura 3 - Variação das temperaturas mínima, média e máxima durante o ciclo da cultura do pimentão, 2022.



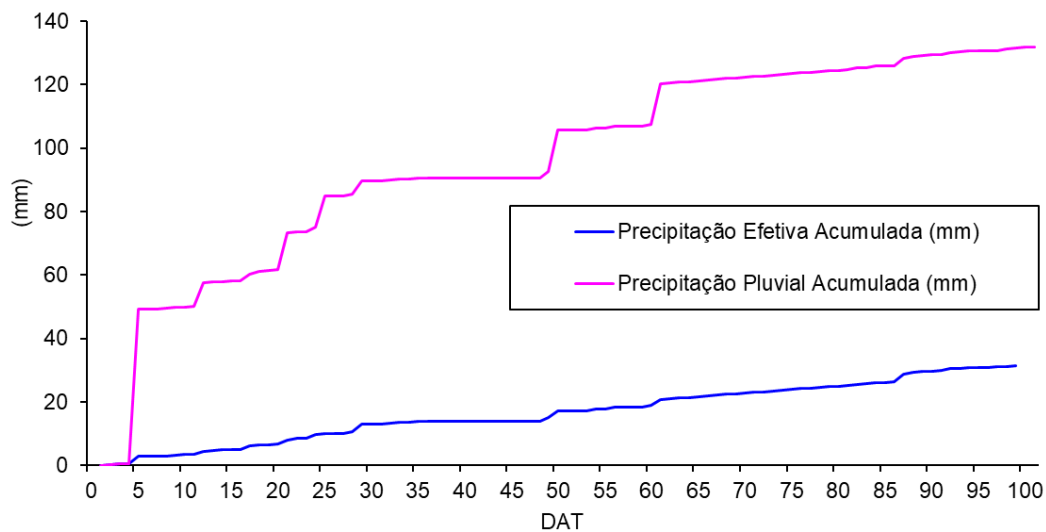
Legenda: DAT - Dias após o transplante; Tmax – Temperatura Máxima; Tmin – Temperatura Mínima e Tméd – Temperatura Média.

Fonte: Autora (2023).

A faixa de temperatura média esteve entre 10,7 ° C a 23,5 ° C, com o valor médio de 18,20 ° C. A menor temperatura registrada foi de 3,2 ° C obtida aos 63 DAT. Já a temperatura máxima obtida aos três dias após o transplante foi de 31,9° C.

Durante o período experimental, a precipitação total acumulada e precipitação efetiva acumulada foi de 132,04 e 32,07 mm, respectivamente (Figura 4). Logo, a insuficiência de chuvas justifica a necessidade de irrigação neste estudo.

Figura 4 - Precipitação pluvial e precipitação efetiva acumuladas durante o período de cultivo do Pimentão (2022), STELLA.

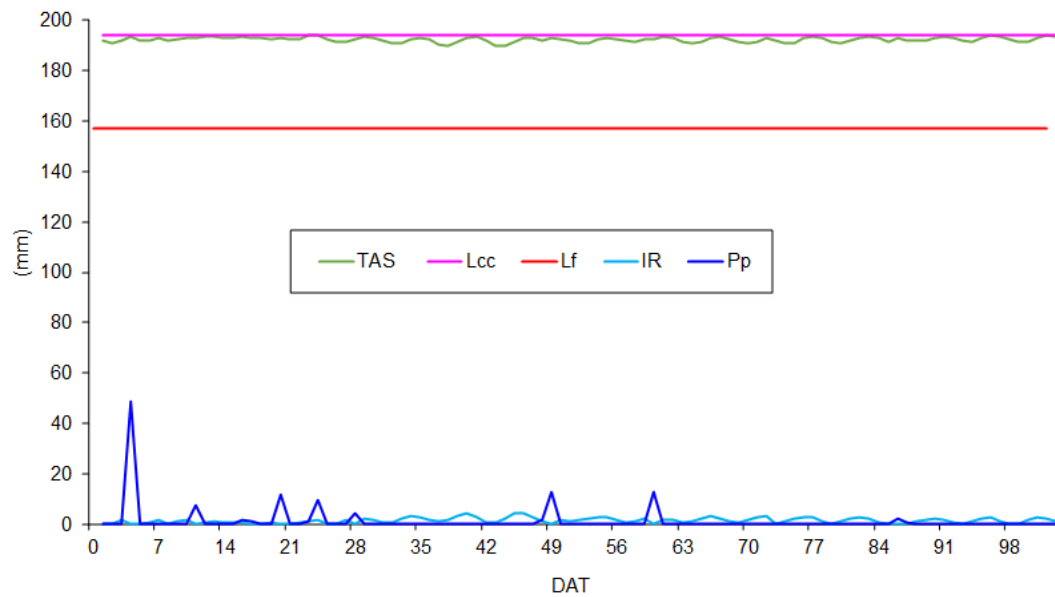


Fonte: Autora (2023).

A Figura 5 representa a simulação da lâmina de água no solo para a maior lâmina irrigada. As lâminas de água na capacidade de campo, ponto de murcha permanente e na umidade crítica (fator p) foram de 194,02; 101,97 e 157,20 mm, respectivamente.

A capacidade de armazenamento de água desse solo foi de 36,82 mm para uma profundidade efetiva das raízes de 40 cm em ambos os ciclos cultivados. O teor de água se manteve próximo à lâmina na capacidade de campo (Figura 5).

Figura 5 - Balanço de água no solo durante o período de cultivo, apresentado pelo STELLA.

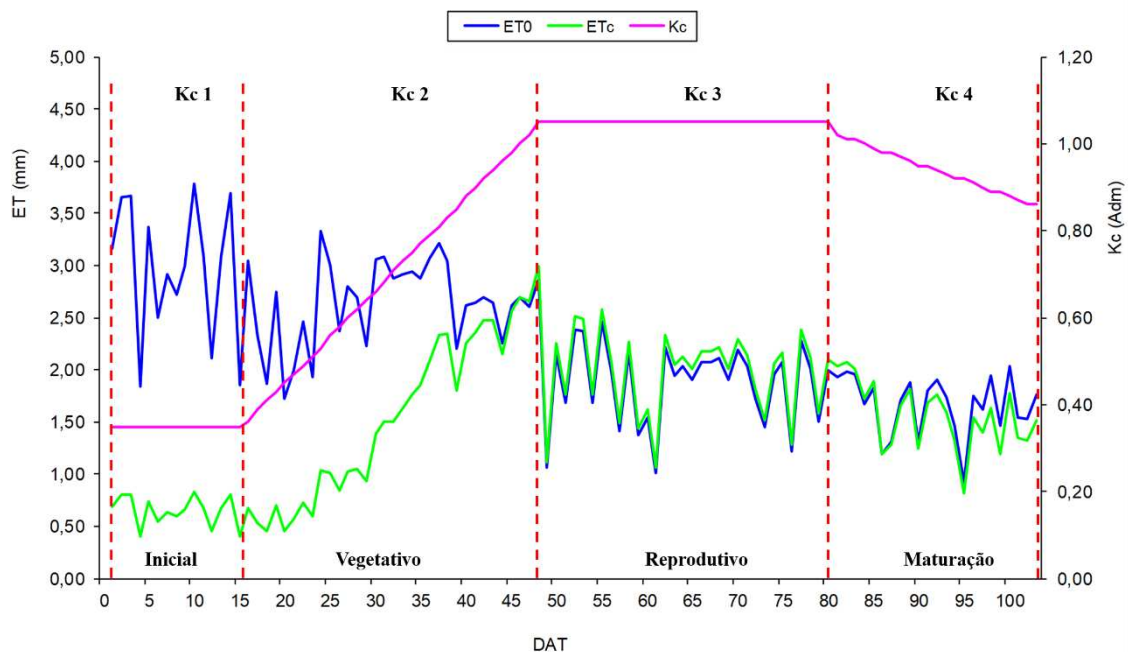


Legenda: TAS – Teor de água no solo; DAT - Dias após o transplante; Lcc – Lâmina de água na capacidade de campo; Lf – Lâmina de água na umidade crítica; IR- Irrigação; Pp – Precipitação pluvial.

Fonte: Autora (2023).

Na Figura 6 estão apresentados os gráficos de evapotranspiração de referência e da cultura, com a variação de K_c ao longo do ciclo. Os dados climáticos referentes ao período de cultivo do pimentão foram inseridos no modelo para estimativa da evapotranspiração de referência.

Figura 6 - Evapotranspiração de referência, da cultura e o coeficiente cultural, sub-rotina Balanço Hídrico, STELLA.



Fonte: Autora (2023).

A diferença entre os resultados obtidos para ET_0 e ET_c são mais evidentes no início do ciclo. Nos estádios iniciais, o K_c assume um valor menor, uma vez que a planta é menos desenvolvida. De modo que é possível notar os maiores valores de ET_0 em comparação com a ET_c no estágio inicial.

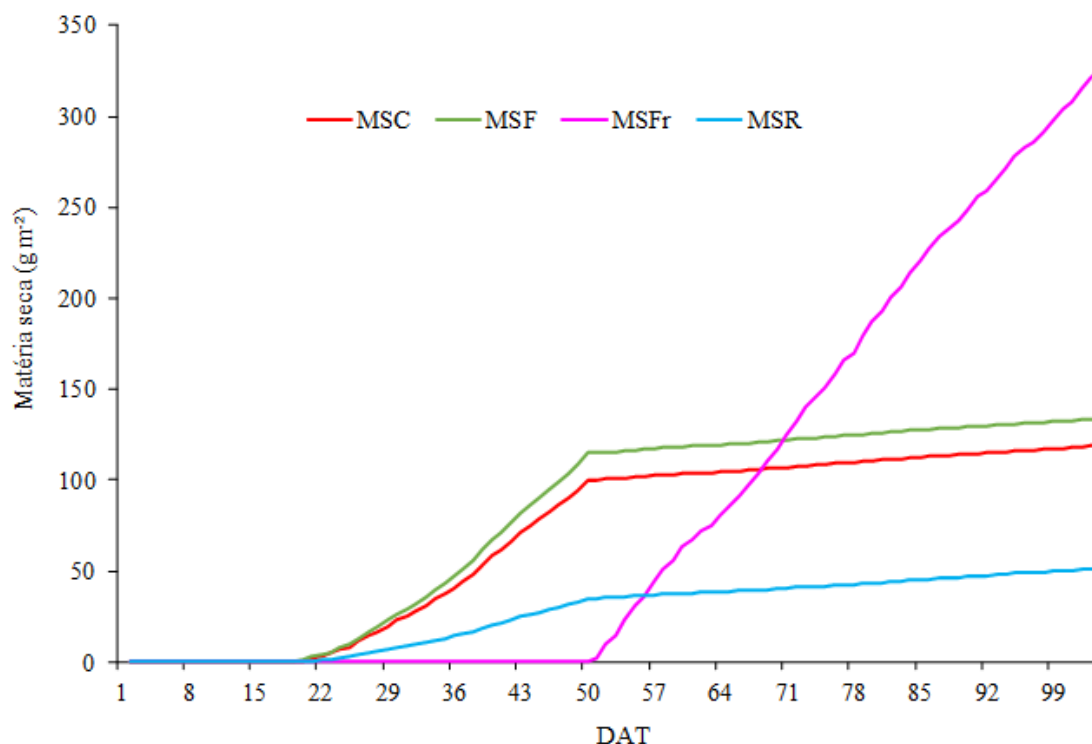
Houve um aumento na ET_c a partir da fase de desenvolvimento da cultura. O valor máximo encontrado para a ET_c foi de 3 mm, com a mínima registrada de 0,40 mm e a média para a ET_c foi de 1,56 mm. A ET_c acumulada durante o período cultivado (98 DAP) foi de 154,17 mm.

As lâminas totais aplicadas durante o período cultivado (98 DAP) foram de 214,54; 160,91; 107,27 e 53,64 para os respectivos percentuais de 100%, 75%; 50% e 25 % da ET_c .

3.2 Partição da biomassa

Na Figura 7 são apresentados os valores da massa seca acumulada durante o período cultivado sem restrição hídrica, ou seja, considerando a lâmina de irrigação de 100% ET_c equivalente a 214,54 mm.

Figura 7 - Massa seca dos constituintes da planta (g m^{-2}), STELLA.



Legenda: MSC – Massa seca do caule; MSF – Massa seca de folhas; MSFr – Massa seca do fruto e MSR – Massa seca de raízes.

Fonte: Autora (2023).

Ao início do desenvolvimento da cultura até o término da floração, observa-se um crescimento expressivo para a massa seca acumulada de folhas, caules e raízes. Após o início da frutificação, a massa seca destes constituintes se tornou menos expressiva. Isso é devido a predominância da fase reprodutiva sobre a vegetativa, o que modificou a força de drenos da planta, translocando mais fotoassimilados para os frutos (TAIZ et al., 2017).

No desenvolvimento vegetativo, a massa seca acumulada de folhas foi superior aos valores encontrados para a MSC e MSR. A massa seca de folhas obtida até os 49 DAT foi de 14,59 g por planta após esse período houve uma redução na taxa de crescimento das folhas, com valor de 22,97 g por planta até os 98 DAT.

A massa seca do caule foi acumulada continuamente até os 98 DAT, atingindo valor de 22,10 g por planta. O acúmulo de massa seca das raízes também foi contínuo ao longo do ciclo da cultura. A quantidade de massa seca acumulada até os 98 DAT foi de 7,25 g por planta.

A frutificação da cultura teve início aos 50 DAT e com isso o acúmulo de matéria seca do fruto. A massa seca de frutos total acumulada até os 98 DAT foi 54,63 de g por planta, que foi superior a massa seca acumulada individualmente por cada órgão da planta, caracterizando o pimentão como o principal dreno na partição de fotoassimilados.

Neste estudo, para as demais lâminas irrigadas o acúmulo de massa seca produzida pelas plantas foi inferior a lâmina de 100 %ETc. O comportamento da força do dreno seguiu o mesmo padrão da Figura 7, para todas as lâminas irrigadas.

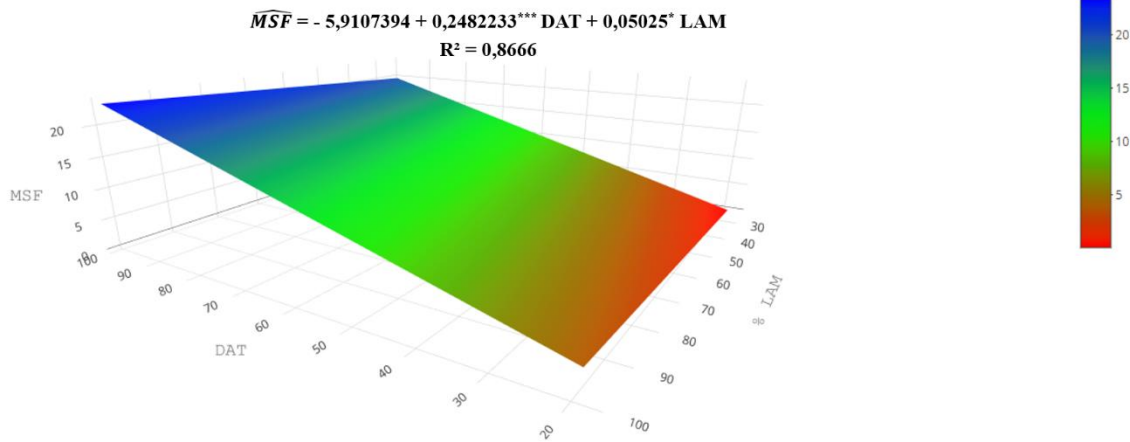
Considerando a lâmina de 25 % ETc, as massas secas obtidas até os 98 DAT para as folhas, caule, raízes e frutos foram de 14,63; 13,11; 4,63 e 43,57 g por planta, respectivamente. Na lâmina de 50 % ETc, a massa seca acumulada para as folhas, caule, raízes e frutos até o final do ciclo foi de 15,83; 13,79, 5,28 e 47,86 g por planta, respectivamente. E por fim, os valores médios de massa seca acumulados na lâmina de 75% ETc foram de 16,79; 15,24; 6,15 e 50,88 g por planta para os respectivos órgãos da planta: folhas, caule, raízes e frutos.

3.3 Comparação entre os modelos STELLA e Experimental

No modelo computacional, os valores de massa seca das folhas (MSF); massa seca do caule (MSC); massa seca de raízes (MSR) e massa seca de frutos (MSFr) foram verificados no próprio STELLA para as datas nas quais foram feitas as análises de campo. Já as equações dos modelos experimentais referentes aos dados mensurados em campo, foram obtidos a partir das curvas de superfície de resposta elaboradas no RStudio.

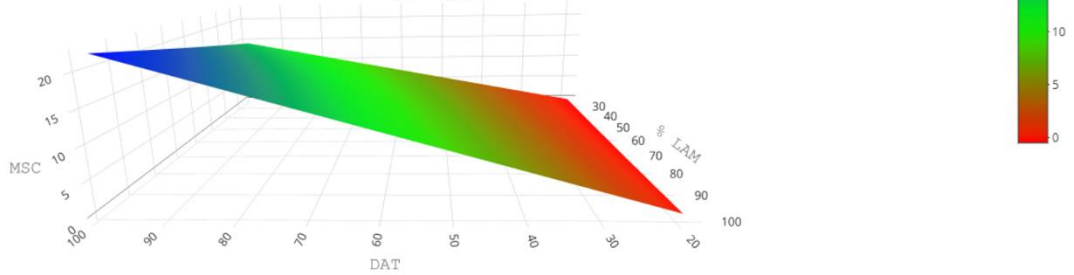
De acordo com Shanock et al. (2010), a análise da curva de superfície de resposta da regressão é uma abordagem promissora na combinação de diversas variáveis preditas. Para este estudo, as variáveis preditas foram as lâminas irrigadas (% LAM) e os dias após o transplante (DAT) sobre a variável resposta: massa seca de cada um dos constituintes da planta. A partir dessa análise foi possível determinar como a combinação de um ou mais fatores afetou as variáveis respostas, fornecendo uma visualização gráfica tridimensional dos resultados (Figura 8).

Figura 8 - Curva de superfície de resposta para as variáveis relacionadas a matéria seca da planta (g) em função de dias após o transplante (DAT) e lâmina aplicada (LAM): A) MSF (Massa seca de folhas); B) MSC (Massa seca do caule); C) MSR (Massa seca de raízes) e D) MSFr (Massa seca de frutos).



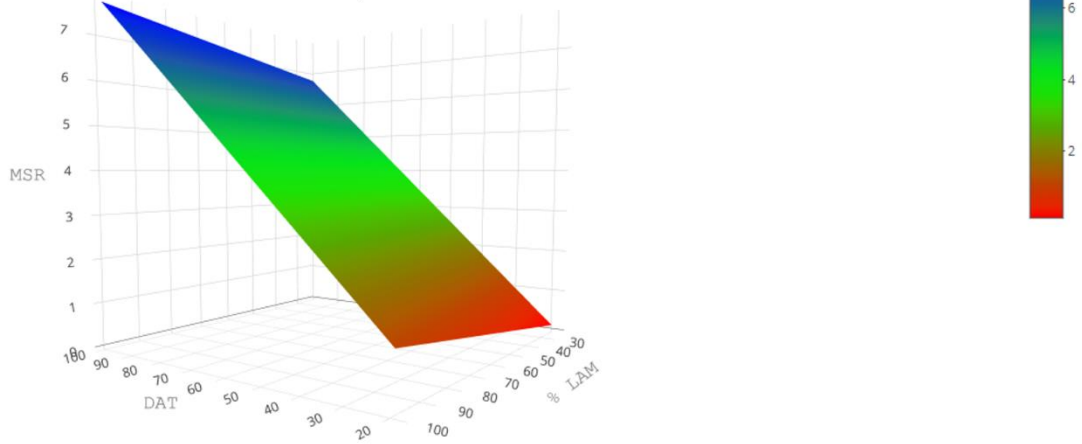
A

$\widehat{MSC} = - 3,3576856 + 0,153221^{***} \text{DAT} - 0,0286006^{ns} \text{LAM} + 0,0000727^{ns} \text{LAM}^2 + 0,0013157^{***} \text{DAT} \times \text{LAM}$
 $R^2 = 0,9343$

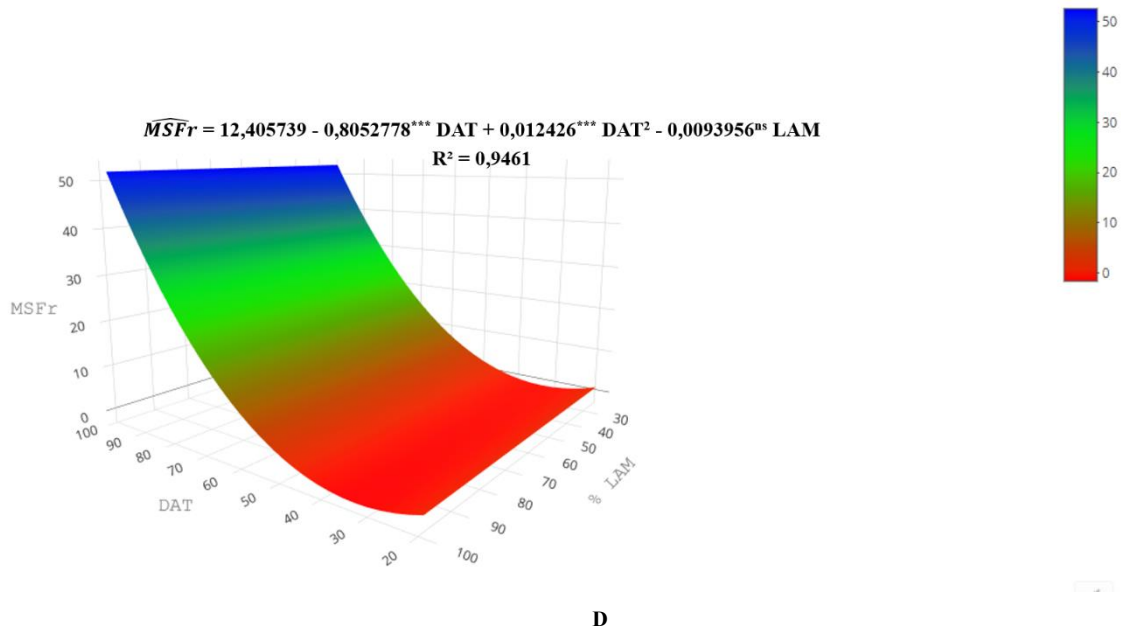


B

$\widehat{MSR} = - 1,7706466 + 0,0836248^{***} \text{DAT} + 0,0127444^{***} \text{LAM}$
 $R^2 = 0,8127$



C



*** Significativo a 1% pelo teste "t". ** Significativo a 5% pelo teste "t". * Significativo a 10% pelo teste "t". ^{ns} Não significativo.

Fonte: Autora (2023).

A Figura 8A representa a curva de superfície de resposta para o modelo MSF (Massa seca de folhas) em função de dias após o transplante (DAT) e lâmina aplicada (LAM). As variáveis preditoras (DAT e LAM) do modelo de regressão foram significativas. Pela equação apresentada neste modelo, observa-se que fixando a variável DAT, a cada 1% de variação na lâmina aplicada, há um aumento médio de 0,2482 g na massa seca das folhas. Quando é fixado a variável LAM, a cada uma unidade de variação nos dias após o transplante, observa-se um aumento médio de 0,005 g para a MSF.

Quanto menor o período de desenvolvimento cultura associado as menores lâminas de irrigação, menores são os valores obtidos para a massa seca de folhas, representados pela faixa vermelha no gráfico (Figura 8A). À medida que a cultura se desenvolve, para os maiores percentuais de lâminas aplicadas, a MSF assume valores superiores a 20g por planta (faixa azul).

Na Figura 8B, a variável DAT e a interação DAT x LAM apresentaram efeito significativo em relação à massa seca do caule. Em contrapartida, para a MSC o efeito da lâmina irrigada não foi significativo. Observa-se que a faixa vermelha é referente aos menores valores de MSC, refletindo assim a fase inicial da cultura.

A equação da curva de superfície de resposta para o modelo MSR (Massa seca de raízes) está apresentada na Figura 8C. As duas variáveis preditoras apresentaram efeito significativo em relação a massa seca de raízes. Quando a variável DAT é fixada, a cada 1% de variação na

lâmina aplicada, há um aumento médio de 0,083 g na massa seca de raízes. Em contrapartida, ao fixar a variável LAM, a cada uma unidade de variação nos dias após o transplante, observa-se um aumento médio de 0,0127 g para a MSR.

O gráfico da Figura 8D representa a curva de superfície de resposta para o modelo MSFr (Massa seca do fruto). Não houve efeito significativo em relação a lâmina irrigada. Entretanto, observou-se um resultado significativo para a variável preditora “DAT”.

Portanto, para a MSF e MSR, as menores lâminas irrigadas associadas aos menores períodos de desenvolvimento da cultura, resultaram em menores valores de massa seca. Em contrapartida, a MSC e MSFr não foram afetadas pela diferença na lâmina aplicada.

Na Tabela 7 estão apresentados a estatística “t”, os valores de $\widehat{\beta}_1$ dos modelos ajustados e o índice d de Willmott et al. (1985) para cada combinação entre os modelos.

Tabela 7 - Estimativa dos valores da estatística “t”, coeficientes de regressão e “d” de Willmott das combinações entre os modelos para as respectivas variáveis

Combinações entre os modelos	t_{cal}	$\widehat{\beta}_1$	“d”
MSF _(EXP) x MSF _(STELLA)	- 0,930	0,962 ^{ns}	0,974
MSC _(EXP) x MSC _(STELLA)	-0,609	0,955 ^{ns}	0,934
MSR _(EXP) x MSR _(STELLA)	-2,307	0,923 ^{ns}	0,978
MSFr _(EXP) x MSFr _(STELLA)	-0,042	0,997 ^{ns}	0,977

MSF – Massa seca de folhas; MSR – Massa seca de raízes; MSC – Massa seca do caule e MSFr – Massa seca do fruto.

ns - não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “t”.

Fonte: Autora (2023).

O resultado não significativo do teste “t” indica que a hipótese de nulidade não é rejeitada, em que $H_0: \beta_1 = 1$. Logo, os valores estimados de $\widehat{\beta}_1$ foram iguais a 1, evidenciando que os modelos confrontados são estatisticamente iguais.

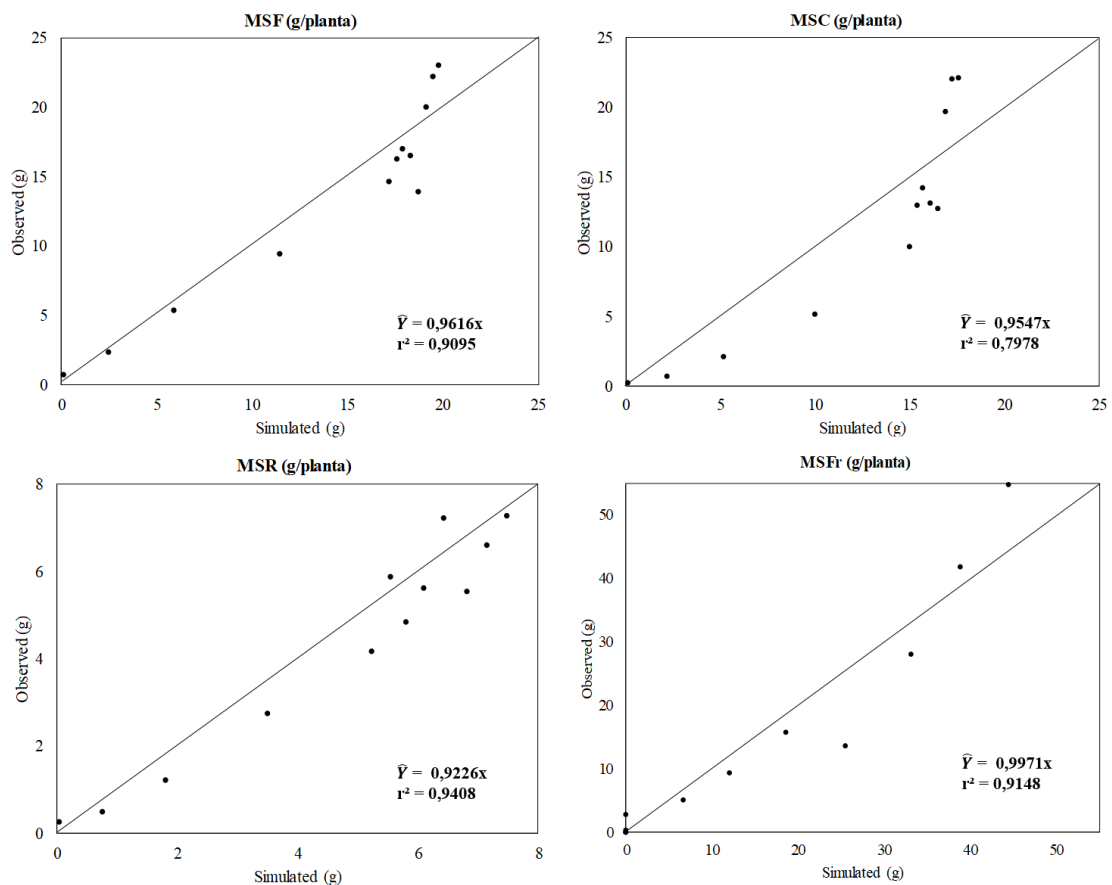
Os resultados do índice “d” comprovam a concordância entre os modelos, sendo estes considerados satisfatórios e com alto nível de concordância, visto que houve uma variação de 0,934 a 0,978 com valores muito próximos da concordância perfeita ($d = 1$).

O valor do índice “d” para MSFr foi de 97,8 %, indicando um ótimo desempenho do modelo na simulação. Também próximo aos valores encontrados para a concordância entre os modelos de massa seca de folhas e raízes.

Os modelos referentes a MSFr, MSF e MSR obtiveram os melhores coeficientes de regressão e as melhores concordâncias. O menor valor do índice “d” foi de 0,934 para a MSC, ainda assim muito próximo de 1, indicando uma excelente concordância entre os modelos.

Na Figura 9, estão apresentados os gráficos das características estudadas para os dois modelos, durante o ciclo da cultura.

Figura 9 - Comparação os valores observados e preditos pelo modelo STELLA da massa seca de folhas (MSF), massa seca de frutos (MSFr), massa seca de caule (MSC) e massa seca de raízes (MSR).



Fonte: Autora (2023).

As discrepâncias foram baixas entre os valores mensurados e simulados para quase todos os modelos confrontados. É possível observar que as comparações entre os modelos estudados para as características massa seca de folhas e frutos (MSF e MSFr) foram os que

apresentaram menores diferenças entre os valores observados e simulados. Em que os desvios dos valores em relação à reta da função identidade foram pequenos. Além disso, os valores de r^2 encontrados variaram entre 79,78% e 94,08%, cujo menor valor observado referiu-se a variável MSC, indicando uma maior dispersão entre os valores preditos.

3.4 Capacidade preditiva do modelo

A produtividade do pimentão irrigado foi de 33,50; 37,45; 39,74 e 42,41 t/ha para as respectivas lâminas irrigadas, considerando 25%; 50 %; 75% e 100% ETc. Logo, a redução da lâmina irrigada manteve a produtividade da cultura consumindo menos água, com o solo mantido próximo a capacidade de campo.

O valor previsto para a massa seca do pimentão irrigado no modelo do STELLA foi de 47,02 g por planta valor próximo ao resultado encontrado em campo de 54,63 g por planta para a maior lâmina aplicada, cujos resultados foram estatisticamente iguais.

Assim, o modelo do STELLA foi capaz de prever a produtividade da cultura. Esta afirmação pode ser evidenciada no item 3.3 deste trabalho, com o melhor resultado para a comparação entre os valores simulados e observados para os frutos, além de apresentar a melhor concordância entre estes modelos.

4. DISCUSSÃO

O modelo de simulação dinâmica para a cultura do pimentão construído a partir do software STELLA simulou os processos relacionados a fenologia, crescimento e desenvolvimento e produção de matéria seca da planta. No escopo deste trabalho foram abordados somente os aspectos referentes a produção de matéria seca (Figura 7), cujos parâmetros foram parametrizados no modelo, como os coeficientes de partição dos constituintes da planta.

A simulação da produção de matéria seca da planta utilizando o software STELLA foi comparada aos valores mensurados em campo, cuja a resposta obtida foi eficiente e semelhante a realidade. Poulouse, Kumar e Ganjegunte (2021), utilizando o software STELLA para simular o fluxo de água no solo e absorção de água pelas raízes em culturas com estresse hídrico e salino, afirmaram que o software STELLA é uma ferramenta eficiente na representação de um sistema dinâmico, cujos resultados obtidos na simulação são coerentes com a realidade.

A variação de temperatura durante o ciclo da cultura, conforme apresentado na Figura 3, manteve-se dentro da faixa ideal para o desenvolvimento do pimentão, cujos valores descritos por Brandão Filho et al. (2018), estão entre 18 e 23 ° C. Houve apenas alguns eventos em que a temperatura ficou abaixo de 10 °C (Figura 3).

A ocorrência de chuvas durante o período cultivado foi insuficiente para suprir a demanda hídrica da cultura, uma vez que os valores de precipitação acumulada até os 98 DAT (Figura 4), foram inferiores a faixa correspondente a necessidade hídrica do pimentão, cujos valores estão entre 300 a 700 mm, segundo Changade et al. (2009), a depender das condições climáticas da região cultivada. Além disso, a ocorrência de altas intensidades de precipitação em um curto período de tempo justifica a baixa efetividade da precipitação, durante o ciclo da cultura.

Em outros estudos, a demanda hídrica do pimentão até os 98 DAT foi de 267,42 mm, considerando a reposição de água referente a lâmina de 100 % ET_c (SOUZA et al., 2019). Tais resultados obtidos por Souza et al. (2019) foram semelhantes ao encontrado nesta pesquisa, considerando a mesma lâmina aplicada de 100% ET_c.

A disponibilidade hídrica além de estar associada à precipitação pluvial, também considera as características do solo. Neste estudo, foi utilizado um solo argiloso com alta capacidade de retenção de água no solo (Tabela 2). Como os solos argilosos possuem uma capacidade maior de armazenamento de água quando comparado aos solos arenosos (LAL; SHUKLA, 2004), provavelmente, a água presente no perfil do solo pode ter ficado mais tempo disponível para as plantas (Figura 5).

Ademais, como neste estudo foi utilizado um sistema de irrigação por gotejamento, cujas aplicações de água ocorrem em alta frequência e baixa vazão (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009), o que influenciou no teor de umidade do solo ter sido mantido próximo a capacidade de campo (Figura 5).

Assim, os diferentes níveis de reposição de água no solo não afetaram a resposta da planta em relação ao rendimento do fruto, conforme foi apresentado na Figura 8D. Isso devido à frequência de irrigação diária, considerando que o sistema de irrigação localizada demanda turno de rega menores e irrigam menor volume de água, o que manteve o teor de água no solo superior a lâmina na umidade crítica para todas as diferentes lâminas aplicadas.

Entretanto, os maiores níveis de reposição hídrica impactaram positivamente a resposta da planta em relação ao crescimento e ao acúmulo de massa seca das folhas e de raízes, com maiores lâminas irrigadas ao longo do tempo (Figura 8A e 8C). Por outro lado, a MSC e MSFr não sofreu influência das lâminas de irrigação. Assim como, De Matos Filho, Da Silva e Bastos

(2020) também não observaram diferença estatística entre lâminas irrigadas para o caule do pimentão até os 120 DAT, para o diâmetro do fruto aos 100 DAT e no número de frutos por planta aos cultivado em latossolo, sob quatro níveis diferentes de irrigação.

No estudo realizado por Padrón et al. (2015), também não foi verificado efeito significativo das lâminas irrigadas em relação ao diâmetro do fruto do pimentão e a variabilidade entre as lâminas irrigadas também não influenciou na resposta do caule. Uma pesquisa semelhante com diferentes lâminas de irrigação no cultivo do tomate no Vale do Jordão por AL-QEREM, SULEIMAN e SHATANAWI (2012) também não obteve diferença significativa no rendimento dos frutos.

Logo, a resposta do fruto a aplicação da lâmina irrigada pode ser explicada pela competição de assimilados, em que a presença de um fruto em desenvolvimento pode inibir o crescimento e desenvolvimento de um fruto jovem (MARCELIS et al., 2004). E por ser uma espécie de crescimento indeterminado, em que as plantas continuam a crescer após a floração inicial, produzindo ramos e frutos em diferentes estádios de maturação (JANE et al., 2019; LOPES et al., 2018). Além de que, a cultura do pimentão é mais sensível ao déficit de irrigação no período de floração (COLAK, 2021), o que também explica a influência das lâminas de irrigação na massa seca das folhas.

Neste estudo também não foi observado diferença estatística entre o rendimento da cultura para os diferentes níveis de reposição hídrica, como mencionado anteriormente no item 3.4. Entretanto, a menor lâmina aplicada resultou na menor produtividade da cultura. Resultados semelhantes foram encontrados por Santos et al. (2018).

Outros estudos realizados no Mediterrâneo avaliando a irrigação com redução das lâminas irrigadas, não obtiverem diferença significativa na produtividade. Ademais, os autores afirmaram que é possível manter o rendimento da cultura utilizando irrigação por déficit controlado no gotejamento (COLAK, 2021; NAGAZ, MASMOUDI, MECHLIA, 2012). Portanto, é possível afirmar a utilização da menor lâmina minimiza o consumo de água sem fornecer prejuízos ao rendimento da cultura (SHAMMOUT et al., 2018). A produtividade obtida no modelo foi estatisticamente igual a produtividade de campo para todas as lâminas irrigadas, assim como os dados de massa seca do modelo foram concordantes (Tabela 7), evidenciando que este é útil na simulação das características da planta, fornecendo uma base científica para a gestão agrícola.

5. CONCLUSÕES

O modelo construído foi útil na simulação da matéria seca da planta.

A produção de matéria seca simulada para os componentes da planta é estatisticamente igual a massa seca da planta mensurada em campo.

As lâminas irrigadas não influenciaram na massa seca do fruto.

6. REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (FAO, irrigation and drainage paper, 56).

AL-QEREM, R.A.; SULEIMAN, A.A.; SHATANAWI, M.R. Assessing Tomato Yield and Water Saving under Deficit Irrigation in the Jordan Valley. **Jordan J. Agric. Sci.**, v. 8, p. 209–222, 2012.

ARCHONTOULIS, S. V et al. Predicting crop yields and soil-plant nitrogen dynamics in the US Corn Belt. **Crop Science**, v. 60, n. 2, p. 721–738, 1 mar. 2020.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019. 545p.

BRANDÃO FILHO, et al. **Hortaliças-fruto** [online]. Maringá: EDUEM, 2018, 535 p. ISBN: 978-65-86383-01-0. <https://doi.org/10.7476/9786586383010>.

CHANGADE, N. M. et al. Determination of emission uniformity of emitter in gravity fed drip irrigation system. **International Journal of Agricultural Engineering**, v. 2, n. 1, p. 88-91, 2009.

COLAK, Y. B. Leaf water potential for surface and subsurface drip irrigated bell pepper under various deficit irrigation strategies. **Chilean journal of agricultural research**, v. 81, n. 4, p. 491-506, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392021000400491>

DA SILVA ALBUQUERQUE, F. et al. Necessidade hídrica e coeficiente de cultivo do pimentão fertirrigado. **Irriga**, v. 17, n. 4, p. 481-493, 2012.

DE MATOS FILHO, H. A.; DA SILVA, C. A.; BASTOS, A. V. S. Níveis de irrigação associados a doses de hidrogel na cultura do pimentão. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 2, p. 3906, 2020.

DE SOUZA, A. P. et al. Evapotranspiration, crop coefficients and water use efficiency of the bell pepper crop in different cropping systems/Evapotranspiracao, coeficientes de cultivo e eficiencia do uso da agua da cultura do pimentao em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 15-23, 2011.

HANNON, B.; RUTH, M. Modeling Dynamic Biological Systems. In: **Modeling Dynamic Biological Systems**. Cham: Springer International Publishing, p.3-28, 2014.

HFBRASIL, 2017. HORTIFRUTI/CEPEA: Principais características do pimentão no BR. Disponível em: hfbrasil.org.br.

ISEE SYSTEMS (2023). **SYSTEMS THINKING IN EDUCATION**. Acessado em 15 de maio de 2023. Disponível em: <https://www.iseesystems.com>.

JANE, S. A. et al. Comparison of polynomial and nonlinear models on description of pepper growth. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 4, p. 1–7, 2019.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. CRC Press, 2004.

LOPES, S. M. et al. Avaliação de frutos de pimentão submetidos ao ensacamento no cultivo orgânico. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 1, 2018.

MALDONADO, V. O cultivo do pimentão. **Revista Cultivar Hortaliças e Frutas**, n. 5, 2015.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **IRRIGAÇÃO: Princípios e Métodos**. 3ª edição. Viçosa–MG. Ed. UFV, 2009.

MARCELIS, L. F. M. et al. Flower and fruit abortion in sweet pepper in relation to source and sink strength. **Journal of experimental Botany**, v. 55, n. 406, p. 2261-2268, 2004.

NAGAZ, K., MASMOUDI, M.M., MECHLIA, N.B. Effects of deficit drip-irrigation scheduling regimes with saline water on pepper yield, water productivity and soil salinity under arid conditions of Tunisia. **Journal of Agriculture and Environment for International Development**, v.106, n. 2, p.85-103, 2012.

OUYANG, Y. et al. A STELLA-Based Model to Simultaneously Predict Hydrological Processes, N Uptake and Biomass Production in a Eucalyptus Plantation. **Forests**, 2021.

PADRÓN, R. A. R. et al. Desenvolvimento vegetativo de pimentão cultivado com lâminas e frequências de irrigação. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 9, n. 2, p. 49-55, 2015.

PARIZI, A. R. C. et al. Corn yield under various simulated irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3 p. 503-514, 2016.

POULOSE, T.; KUMAR, S.; GANJEGUNTE, G. K. Robust crop water simulation using system dynamic approach for participatory modeling. **Environmental Modelling & Software**, v. 135, p. 104899, 2021.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G., ALVAREZ V., V.H. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5a Aproximação**. Viçosa, MG. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p.43-60, 1999.

ROCHA, P. A. **Produção de pimentão sob diferentes estratégias de irrigação com e sem cobertura do solo, no Semiárido Baiano**. Guanambi, Ba. Dissertação - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Guanambi, 672 p., 2017.

SANTOS, I.M.S. et al. Irrigation management methods for the production of bell pepper in agricultural substrates. **Bragantia** v. 77 p. 510–518, 2018. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017200>

SHAMMOUT, M.W et al. Improving Water Use Efficiency under Deficit Irrigation in the Jordan Valley. **Sustainability**, v. 10, n. 11, p. 4317, 2018. DOI - <https://doi.org/10.3390/su10114317>

SHANOCK, L. R. et al. Polynomial regression with response surface analysis: A powerful approach for examining moderation and overcoming limitations of difference scores. **Journal of Business and Psychology**, v. 25, p. 543-554, 2010.

SHARMA, V.K., SRIVASTAVA, A., MANGAL, M. **Recent Trends in Sweet Pepper Breeding**. In: Gosal, S., Wani, S. (eds) Accelerated Plant Breeding, Volume 2. Springer, Cham., 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47298-6_16

SILVA, P. et al. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO DA CULTURA DO PIMENTÃO (*Capsicum annum*) POR MEIO DO LISÍMETRO DE DRENAGEM. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, p. 2040–2051, 2017.

SOUZA, A. H. C. D. et al. Response of bell pepper to water replacement levels and irrigation times. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 49, 2019.

SOUZA, R. Y. et al. Calibration and Validation of the AquaCrop Model to Estimate Maize Production in Campos Gerais, Paraná State, Brazil. **Revista Brasileira De Meteorologia**, v. 35, n. 2, p. 243-253, 2020a. <https://doi.org/10.1590/0102-7786352001>

SOUZA, S. A. et al. Impact of irrigation frequency and planting density on bean's morpho-physiological and productive traits. **Water**, v. 12, n. 9, 2020b.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

ZHANG, J., et al. Geographical origin discrimination of pepper (*Capsicum annum* L.) based on multi-elemental concentrations combined with chemometrics. **Food Science and Biotechnology**, 28, 1627–1635, 2019 <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00619-3>

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO 2

Simulação dos graus dias e influência do índice de área foliar no desenvolvimento do pimentão

RESUMO

É fundamental conhecer o efeito que a temperatura exerce sobre ciclo da cultura, como na diferenciação dos estádios fenológicos. A simulação do índice de área foliar associado aos graus-dias é uma ferramenta utilizada na gestão agrícola. Com a finalidade de propor um modelo dinâmico para caracterizar o crescimento e desenvolvimento foliar da cultura do pimentão, baseado em acúmulo de temperatura utilizando o software STELLA, conduziu-se os experimentos na área de Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, Brasil. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, no esquema de parcela subdividida, tendo nas parcelas o fator tempo (19, 26, 33, 41,49, 56, 63, 70, 77, 84, 91 e 98 dias após transplante (DAT)) e nas subparcelas as diferentes lâminas irrigadas (25 %, 50%, 75% e 100% evapotranspiração da cultura (ET_c)), com três repetições. Foram realizados dois ciclos de cultivo do pimentão nos anos de 2021 e 2022, para calibração e validação do modelo. Os dados foram analisados através da metodologia de superfície de resposta. Para verificar a concordância e igualdade entre os modelos utilizou-se o índice “d” e o teste “t”. Os modelos comparados foram concordantes e os valores encontrados para a resposta foliar foram estatisticamente iguais. As curvas ajustadas para o índice de área foliar evidenciam que a metodologia dos graus-dias é viável para determinação dos estádios fenológicos da cultura. O software STELLA pode ser utilizado como ferramenta na modelagem dos processos morfológicos da cultura do pimentão.

Palavras-chave: Fenologia. Tempo térmico. Modelos dinâmicos.

Simulation of degree days and influence of leaf area index on bell pepper development

ABSTRACT

It is essential to know the effect that temperature has on the crop cycle, as in the differentiation of phenological stages. The simulation of the leaf area index associated with degree-days is a

tool used in agricultural management. With the purpose of proposing a dynamic model to characterize the growth and leaf development of the pepper crop, based on temperature accumulation using the STELLA software, experiments were carried out in the Irrigation and Drainage area of the Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa, Viçosa – MG, Brazil. The experimental design was in randomized blocks, in a split-plot scheme, with the time factor in the plots (19, 26, 33, 41, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91 and 98 days after transplantation (DAT)) and in the subplots the different irrigated depths (25%, 50%, 75% and 100% crop evapotranspiration (ETc)), with three replications. Two bell pepper cultivation cycles were carried out in the years 2021 and 2022, for model calibration and validation. Data were analyzed using response surface methodology. To verify the agreement and equality between the models, the “d” index and the “t” test were used. The compared models were concordant and the values found for the leaf response were statistically equal. The adjusted curves for the leaf area index show that the degree-days methodology is viable for determining the phenological stages of the crop. The STELLA software can be used as a tool for modeling the morphological processes of the pepper crop.

Keywords: Phenology. Thermal time. Dynamic models.

1. INTRODUÇÃO

Inúmeros fatores bióticos e abióticos influenciam no desenvolvimento das culturas. Dessa forma, a caracterização da duração fenológica da planta baseada apenas em dias é uma metodologia imprecisa, visto que o desenvolvimento cultural é afetado pelas variações ambientais (LOPES et al., 2005).

De acordo com Isler, De Oliveira Florentino e Martins (2012), a influência exercida por tais variações, como solo, radiação solar, água e temperatura, pode acelerar ou retardar o ciclo da planta. Dentre os componentes climáticos, a temperatura do ar se destaca como preditor do desenvolvimento da cultura (LOPES et al., 2005).

A relação que a temperatura do ar exerce sobre o ciclo vegetativo é descrita pelo acúmulo de graus-dias (ISLER; DE OLIVEIRA FLORENTINO; MARTINS, 2012). A partir da determinação dos graus-dias acumulados é possível definir o estágio cultural (ARNOLD, 1959), assim como auxiliar no planejamento da safra (SOUZA; LEONEL; SILVA, 2011).

Além disso, a disponibilidade hídrica também pode afetar a resposta cultural, provocando alterações nos componentes metabólicos e morfofisiológicos da planta (FERRARI

et al., 2015). A combinação desses fatores pode ser empregada nos modelos de simulação de cultura.

Os modelos de simulação são capazes de prever a produtividade das culturas, o particionamento dos carboidratos para os diferentes órgãos da planta, assim como estimar a área foliar baseado no acúmulo de graus-dias (RENATO et al., 2013). FERNEDA et al. (2016) afirmam que o emprego dos modelos de simulação com base em parâmetros climáticos contribui em diversas áreas relacionadas a produção agrícola.

O software STELLA é uma ferramenta computacional eficiente na modelagem de uma infinidade de cenários. A partir de equações diferenciais ordinárias implementadas no STELLA é possível simular uma diversidade de sistemas dinâmicos e obter um panorama futuro de diversas áreas (COSTANZA; VOINOV, 2001). Muitos são os modelos que podem ser desenvolvidos e simulados por meio do STELLA®, como modelos de produtividade, ciclo de carbono, sistemas climáticos e hidrológicos, manejo de irrigação, entre outros (MIRANDA et al., 2014, TAPIA et al., 2014, COSTANZA; VOINOV, 2001).

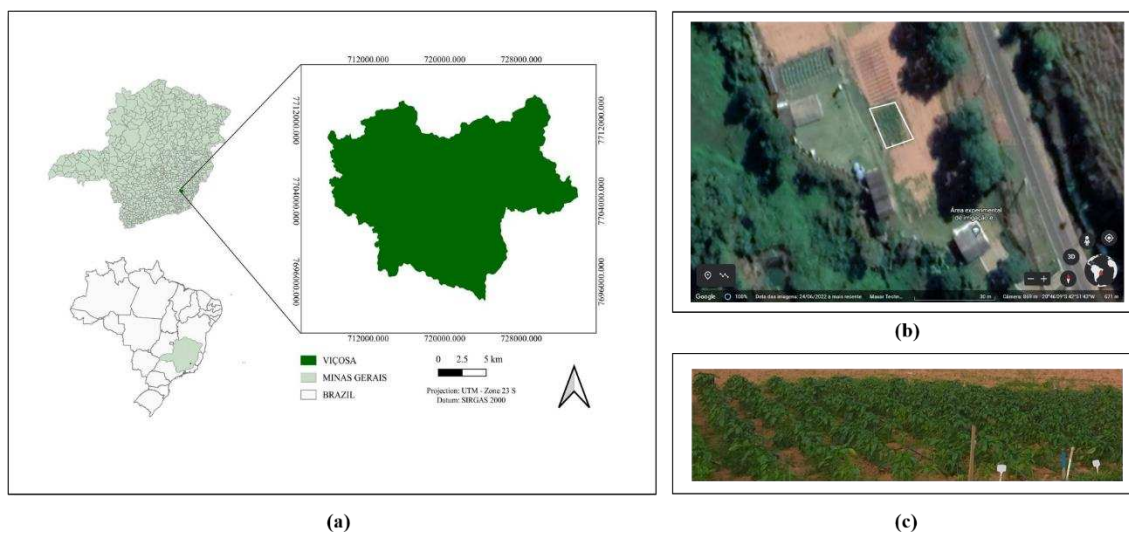
Dessa forma, o objetivo neste trabalho foi construir um modelo para estimar as mudanças dinâmicas no índice de área foliar do pimentão considerando as variações climáticas, a partir da simulação dos graus-dias acumulados, utilizando o software STELLA.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Características do experimento

A área experimental está localizada na cidade de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil, cujas coordenadas geográficas são 20° 45' 45.4"S de latitude e 42°51' 50.5"W de longitude e altitude média de 698 m (Figura 1). O experimento seguiu o esquema de parcela subdividida, tendo nas parcelas o fator tempo (com início aos 19 DAT e término aos 98 DAT) e nas subparcelas quatro diferentes lâminas irrigadas (25 %, 50%, 75% e 100% ET_c) no delineamento em blocos ao acaso, com três repetições.

Figura 1 - Área de estudo. (a) Localização. (b) Imagem do Google Earth. (c) Imagem do cultivo em campo.



Fonte: Autora (2023).

Os dados meteorológicos diários de temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e precipitação, foram coletados da estação meteorológica automática situada na área experimental. Para posterior inserção no modelo computacional da cultura do pimentão, durante o período cultivado nos anos 2021 e 2022.

O sistema de irrigação utilizado foi gotejamento com vazão de 1,47 L/h. O manejo da irrigação foi realizado pelo balanço de água no solo, a partir do monitoramento diário da umidade atual pelo método gravimétrico. Para isso, considerou-se os valores de evapotranspiração da cultura e os dados de precipitação durante o período de cultivo.

Previamente à implementação do experimento foram realizadas análises químicas (Tabela 1) e físico-hídricas do solo. A partir dos resultados obtidos na análise de solo, foram realizadas as adubações de plantio e cobertura segundo a recomendação de Ribeiro, Guimarães e V. Alvarez (1999).

Tabela 1 - Características químicas do solo da área experimental de Irrigação e Drenagem (UFV) antes da implantação da cultura do pimentão irrigado.

Prof.	pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	P-Rem
cm	H ₂ O	----mg dm ⁻³ ----		-----cmolc dm ⁻³ -----				mg L ⁻¹
0-20	6,13	31,7	190	3,58	0,82	0,00	4,3	32,2
20-40	5,72	28,1	111	3,23	0,77	0,00	3,2	31,4
40-60	5,52	22,5	107	2,82	0,68	0,00	2,9	23,7

* Extração com solução de Mehlich-1. Prof. – Profundidade de solo.

Fonte: Autora (2023).

O solo da área experimental foi caracterizado como argiloso, apresentando boa capacidade de armazenamento de água. O manejo de pragas e doenças foi realizado a cada sete dias. O espaçamento adotado para a cultura do pimentão foi de 0,50 m de distância na linha e 0,3 m de distância entre plantas.

2.2 Desenvolvimento do modelo

O software STELLA 8.0 (ISEE SYSTEMS, 2023) foi utilizado como ferramenta de modelagem do sistema dinâmico. Além das variáveis de entrada referentes aos dados climáticos, também foram inseridos no modelo os dados de solo e outros parâmetros (Tabela 4). Para isso foram estabelecidas sub-rotinas para designar cada processo separadamente.

No tópico a seguir será apresentado a sub-rotina relacionada a fenologia baseada no tempo térmico e no desenvolvimento da área foliar. Para calibração e validação do modelo foram utilizados dois conjuntos de dados referentes aos dois períodos cultivados.

2.2.1. Descrição das sub-rotinas

Na sub-rotina denominada fenologia foi necessário modelar o estágio fenológico da cultura baseado no acúmulo de temperatura, utilizando a equação definida por Arnold (1959) (Equação 1). Nas sub-rotinas Produção de Matéria Seca, a estimativa do crescimento e aumento da matéria seca foi realizado considerando a eficiência no uso da radiação (RUE) e o coeficiente de extinção da luz do dossel. Além disso, foram determinados e calibrados os coeficientes de partição dos componentes culturais. A equação da produção de matéria seca (Equação 2) foi

adaptada a partir do exposto por Soltani e Sinclair (2012) e Charles-Edwards (1982). As equações descritas anteriormente estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Equações utilizadas na modelagem do Pimentão

Descrição	Equação
Graus-dias acumulados (°C)	$GDA = T_{med} - TB$ (1)
Produção de matéria seca (g CO ₂ m ⁻² d ⁻¹)	$PMS = [(1-EXP(-K \times IAF))] \times R_s \times RUE \times FT \times F_{H_2O} \times F_{CO_2}$ (2)
Índice de área foliar (m ² m ⁻² d ⁻¹)	$IAF = -0.0003 \times (TIME^2) + (0.0605 \times TIME) - 0.7$ (3)
Matéria seca do fruto (g m ⁻² d ⁻¹)	$PFR_i = (PMS \times CoefPaFr)$ (4)
Matéria seca acumulada do fruto (g m ⁻² d ⁻¹)	$PFR = PFR_{i-1} + PFR_i$ (5)

Tmed - temperatura média (°C); TB - Temperatura basal (°C); K - coeficiente de extinção da luz do dossel; R_s - Radiação solar incidente (MJ m⁻² d⁻¹); RUE - eficiência do uso da radiação (g MJ⁻¹); FT - Fator temperatura; F_{H₂O} - Fator disponibilidade hídrica; F_{CO₂} - fator incremento de CO₂; PFR_o - peso seco das folhas (g m⁻² d⁻¹); CoefPaFr - coeficiente de partição do fruto.

Fonte: Autora (2023).

Os estádios fenológicos foram definidos por meio do acúmulo de temperatura ou graus-dias, tomando como referência os valores para temperatura base (TB) mencionada por Guaymasí et al. (2018) para a cultura do pimentão. Entretanto, a soma térmica foi ajustada e calibrada, segundo as observações do desenvolvimento da cultura em campo.

As variáveis de entrada inseridas no modelo estão apresentadas na Tabela 3 e os valores parametrizados referentes a soma térmica para cada estágio fenológico estão expostos na Tabela 4.

Tabela 3 - Variáveis de entrada adotadas na modelagem do Pimentão.

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Capacidade de campo	CC	48,50	%
Ponto de murcha permanente	PMP	25,50	%
Densidade do solo	Ds	1,477	g.cm ⁻³
Profundidade efetiva do sistema radicular	Zcm	40	cm
Coeficiente de cultura na fase inicial	Kc ini	0,35	Adimensional
Coeficiente de cultura intermediário	Kc int	1,05	Adimensional
Coeficiente de cultura na fase final	Kc fin	0,85	Adimensional
Eficiência de aplicação da irrigação	Ea	96	%
Concentração de CO ₂ atmosférico	CO ₂	415.10*	ppm
Fator de disponibilidade de água no solo	<i>f</i>	0,4	Adimensional
Elevação sobre o nível do mar (altitude)	<i>z</i>	698	m
Medida da latitude em graus	Lat °	20	graus
Medida da latitude em minutos	Lat ′	45	minutos
Medida da latitude em segundos	Lat ″	45,4	segundos

*Este valor será adotado como referência do cenário atual, de acordo os dados mais recentes da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (NOAA).

Fonte: Autora (2023).

A partir dos valores de temperatura máxima e mínima inseridos no modelo foi calculado a soma térmica acumulada durante o ciclo cultivado. O critério adotado para a determinação dos graus-dias acumulados considerou a temperatura basal igual a 10° C conforme proposto por Guaymasí et al. (2018), apresentado na Tabela 4.

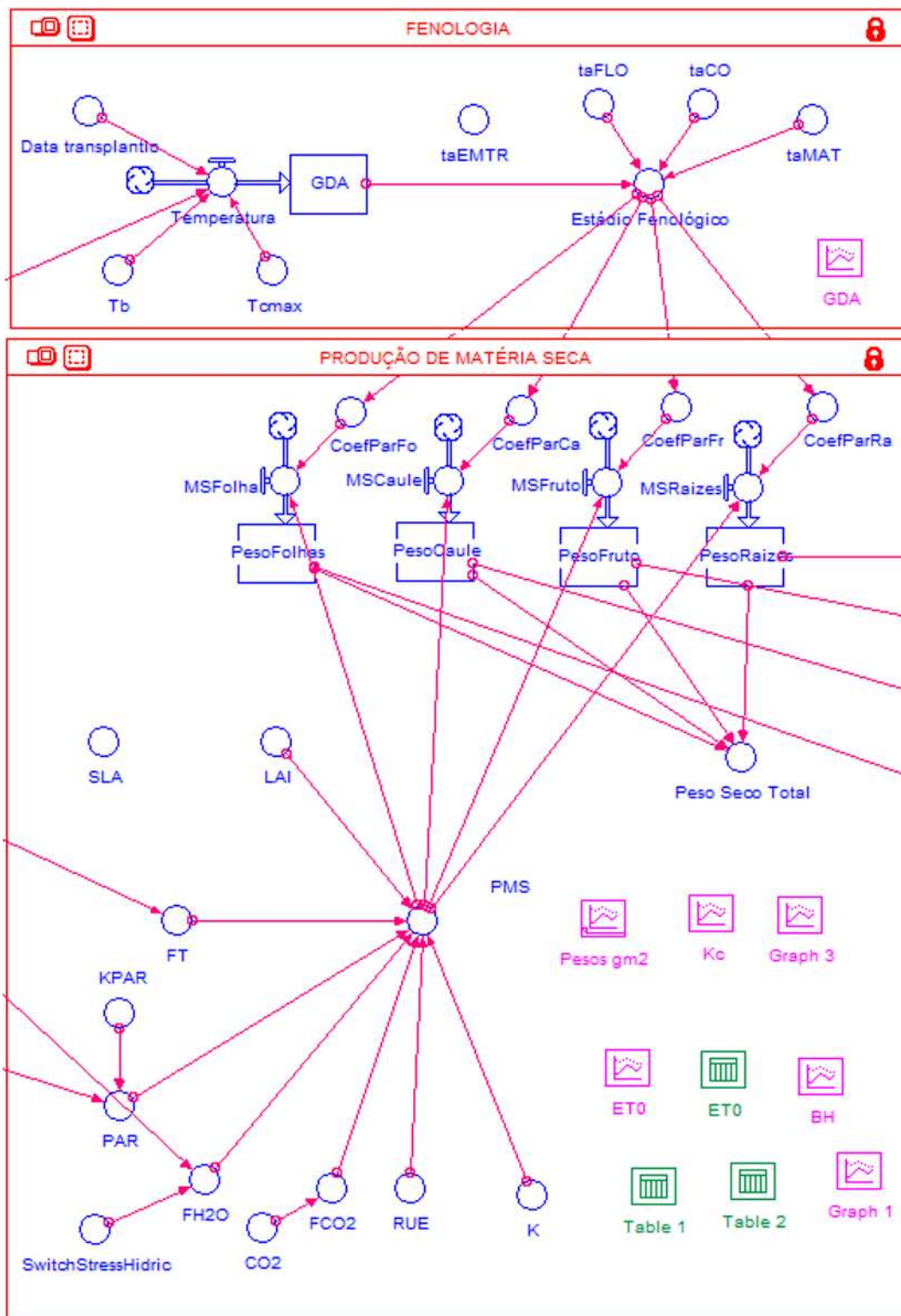
Tabela 4 - Parâmetros adotados na modelagem do Pimentão

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura basal	TB	10	°C
Temperatura acumulada da emergência ao transplante	taEM-TR	446,2	° C
Temperatura acumulada do transplante ao início da floração	taFLO	170	° C
Temperatura acumulada na floração ao início da frutificação	taCO	510	° C
Temperatura acumulada na colheita	taMAT	730	° C
Eficiência do uso da radiação	RUE	2,4	g MJ ⁻¹
Coefficiente de extinção da luz do dossel	K	0,75	Adimensional

Fonte: Autora (2023).

O fluxograma das sub-rotinas Fenologia baseado em graus-dias e a Produção de Matéria Seca pode ser visualizado pela Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma das sub-rotinas para caracterização da “Fenologia e Produção de Matéria Seca” no software STELLA



Fonte: Autora (2023).

2.3 Calibração e validação dos dados

No processo de calibração do modelo é necessário separar um conjunto de dados diferente do conjunto de dados utilizados na validação do modelo. Para o uso amplo dos parâmetros do modelo, os experimentos foram comparados com o cenário ótimo, sob condições de crescimento potencial sem restrição hídrica, livre de insetos, doenças e ervas daninhas. Assim, os dados do primeiro ciclo foram utilizados para calibração do modelo.

Semanalmente foram coletadas doze amostras de plantas durante todo o período de cultivo do pimentão. Estas amostras foram utilizadas para a calibração e validação do modelo. A área foliar foi obtida a partir destas análises destrutivas, cujas folhas foram analisadas utilizando o software ImageJ e o RStudio com o pacote “*Leaf area*”.

A eficiência do uso da radiação (RUE) e o coeficiente extinção de luz do dossel foram submetidos a análise de sensibilidade, cujos os valores adotados para ambas as variáveis foram calibrados no modelo.

A fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel da cultura (PAR) foi calculada e convertida em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, assumindo-se que a radiação fotossinteticamente ativa corresponde a 50 % da radiação solar global diária incidente média (SOLTANI; SINCLAIR, 2012), no período compreendido entre os estádios. A radiação solar incidente foi obtida pela estação meteorológica situada no local do experimento.

Para verificar experimentalmente os valores definidos para o tempo térmico (graus-dias) em cada mudança de estágio fenológico, foi necessário acompanhar a alteração morfológica da planta em campo, com base na percepção visual da resposta da planta a cada um dos estádios definidos. Posteriormente comparou-se a temperatura acumulada até determinado evento com as temperaturas acumuladas em cada estágio, definidas no modelo.

Assim, a partir da avaliação em campo da área foliar foi determinado o índice de área foliar, estabelecido como variável de entrada no modelo. O índice relaciona a área de todas as folhas da planta em função da área de solo ocupada, sendo uma medida adimensional.

2.4 Análise estatística

A análise de dados seguiu a metodologia de superfície de resposta, cuja escolha dos modelos baseou-se na significância dos coeficientes de regressão. Para isso utilizou-se o teste de Student (teste “t”) com nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação (r^2) e no comportamento do fenômeno em estudo.

As hipóteses testadas para comparação dos modelos (computacional *versus* experimental) foram $H_0: \beta_1 = 1$ versus $H_a: \beta_1 \neq 1$, em que o resultado não significativo do teste indica que os modelos estimam os mesmos valores. No caso de rejeição da hipótese de nulidade (H_0) será previsto que a resposta entre os dois modelos de regressão seja diferente.

Para avaliar a concordância entre os modelos foi utilizado o índice “d” ou índice de concordância (WILLMOTT et al., 1985). O índice “d” pode variar entre 0 e 1, em que “d” igual a 1 indica que os modelos são concordantes.

3. RESULTADOS

3.1 Soma térmica ou Graus dias acumulados

Os graus dias acumulados durante o ciclo da cultura do pimentão foram estabelecidos conforme a observação da planta no campo (Tabela 5). Quando a temperatura média foi inferior a temperatura base, o valor calculado para os graus dias diários foi igual a zero. Os estádios fenológicos considerados foram: transplante ao início da floração, floração ao início da frutificação e frutificação ao início da colheita.

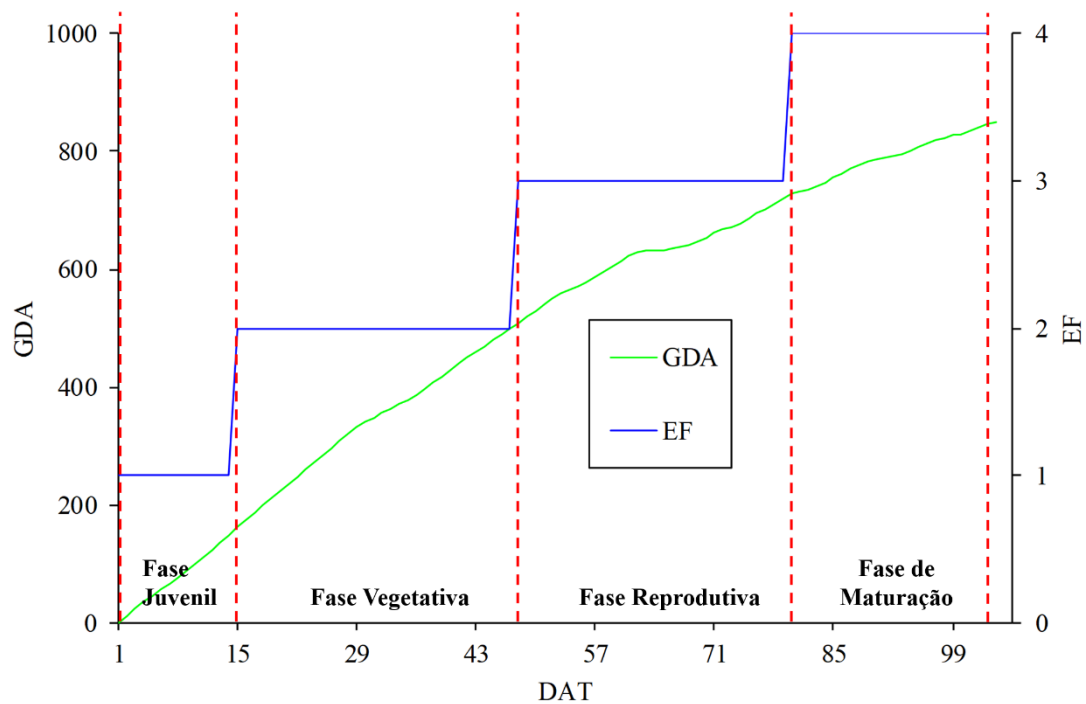
Tabela 5 - Graus dias acumulados (GDA) e duração em dias da divisão fenológica do ciclo do pimentão.

Estádio fenológico	Duração	
	GDA	Dias após o transplantio
Transplante ao início da floração	170	33
Floração ao início da frutificação	510	49
Frutificação ao início da colheita	730	88

Fonte: Autora (2023).

A Figura 3 retrata a divisão entre os principais estádios fenológicos com base na temperatura acumulada, de modo que a resposta da planta foi dinâmica às mudanças de temperatura.

Figura 3 - Representação da temperatura acumulada na sub-rotina Fenologia, STELLA.



Legenda: DAT - Dias após o transplante; GDA- Graus dias acumulados e EF - Estádio Fenológico.

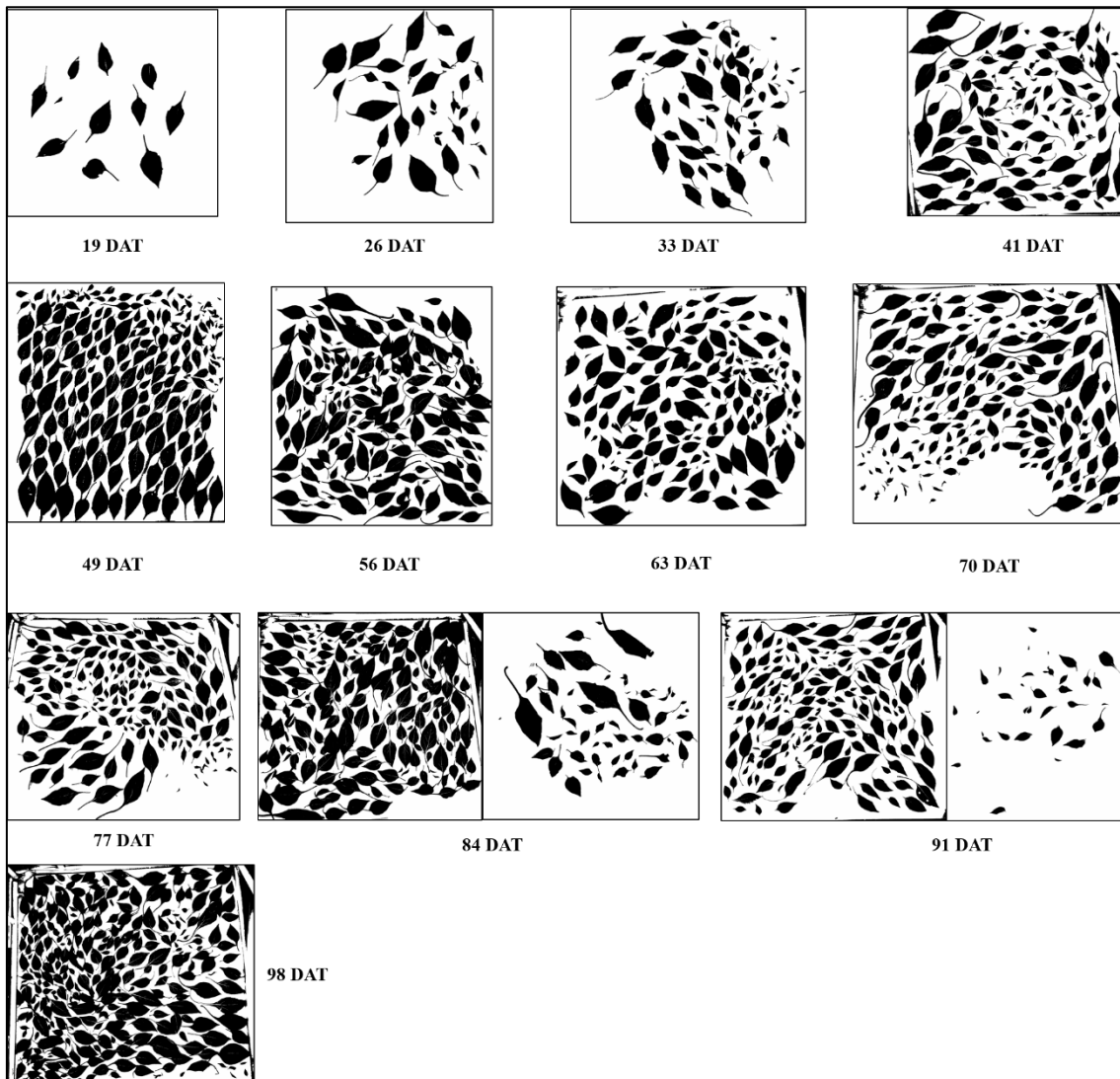
Fonte: Autora (2023).

Nesta pesquisa foram necessários 170 GDA para atingir a floração, conforme apresentado na Tabela 5. Ao início da colheita foram acumulados 730 GDA e aos 98 DAT, a soma térmica acumulada foi de 823 GDA.

3.2 Análise foliar

Na Figura 4 estão apresentados os valores de área foliar (cm^2) obtidos durante o período de cultivo do pimentão. Como mencionado anteriormente, com os valores obtidos para a área foliar foi calculado o índice de área foliar.

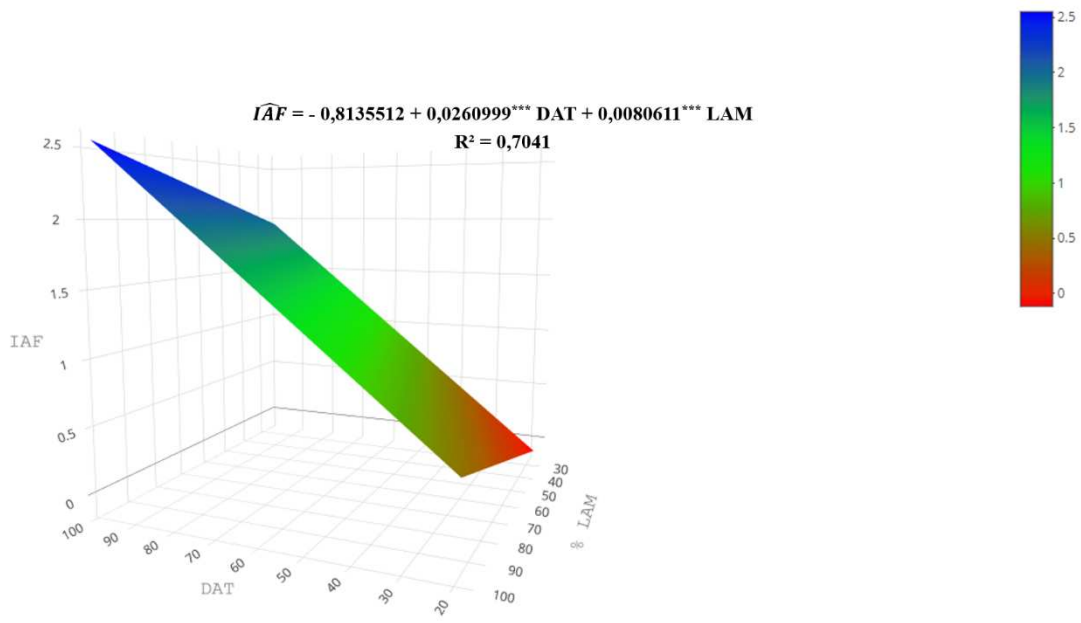
Figura 4 - Imagem da área foliar do pimentão nos 19, 26, 33, 41, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91 e 98 dias após o transplante (DAT) obtida a partir do pacote “Leafarea” do software RStudio.



Fonte: Autora (2023).

Assim, os índices de área foliar (IAF) foram obtidos pela razão entre a área foliar e a área ocupada pela planta. A combinação entre as variáveis predictoras: dias após o transplante (DAT) e lâminas irrigadas (% LAM) sobre a variável resposta: índice de área foliar (IAF), está apresentado na Figura 5. As equações do modelo experimental referentes aos dados mensurados em campo estão descritas na curva de superfície de resposta (Figura 5).

Figura 5 - Curva de superfície de resposta para o índice de área foliar (IAF) em função de dias após o transplante (DAT) e lâmina aplicada (LAM).



*** Significativo a 1% pelo teste "t".

Fonte: Autora (2023).

As variáveis DAT e LAM do modelo de regressão foram significativas a 1%. Pela equação apresentada nesse modelo, observa-se que fixando a variável DAT, a cada um 1% de variação na lâmina irrigada, há um aumento médio de 0,026 m²/m² no índice de área foliar. Quando é fixado a variável LAM, a cada uma unidade de variação nos dias após o transplante, observa-se um aumento médio de 0,008 m²/m² para o IAF.

O índice de área foliar aumenta à medida que a cultura se desenvolve. Quanto mais atendida for a necessidade hídrica da planta, também é observado maiores valores para o IAF. Ao contrário, para o período inicial de desenvolvimento da cultura associado as menores lâminas irrigadas, menores são os valores obtidos para o IAF, os quais estão indicados pela faixa vermelha do gráfico (Figura 5).

Considerando a lâmina de 25 % ETc, o IAF obtido até os 98 DAT foi de 1,18. Na lâmina de 50 % ETc, o valor encontrado para o IAF aos 98 DAT foi de 1,41. E por fim, para as lâminas irrigadas de 75% e 100% da evapotranspiração da cultura, os valores médios obtidos para o IAF foram de 1,67 e 2,35, respectivamente.

3.3 Comparação entre os modelos STELLA e experimental

A estatística “t”, os valores de $\widehat{\beta}_1$ dos modelos ajustados, o índice d de Willmott et al. (1985) e o viés para os modelos confrontados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Estimativa dos valores da estatística, “t”, coeficientes de regressão e “d” de Willmott das combinações entre os modelos para a variável IAF

Combinações entre os modelos	t_{cal}	$\widehat{\beta}_1$	d
IAF _(EXP) X IAF _(STELLA)	- 2,2119	0,842 ^{ns}	0,896

IAF - Índice de área foliar.

ns - não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “t”.

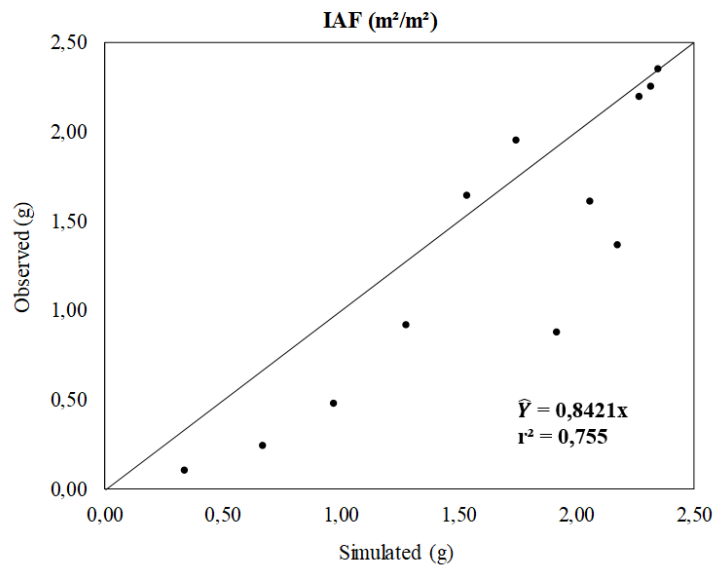
Fonte: Autora (2023).

É possível observar pela Tabela 6, que o teste “t” não foi significativo, indicando que a hipótese de nulidade não é rejeitada, logo $H_0: \widehat{\beta}_1 = 1$. Todavia, os valores estimados de $\widehat{\beta}_1$ foram estatisticamente iguais a 1, evidenciando que os modelos confrontados são estatisticamente iguais.

Existe concordância entre os modelos. Tal afirmativa é evidenciada pela métrica do índice “d” conforme o valor obtido na Tabela 6. Esse índice varia entre 0 e 1 e quanto mais próximo de 1, maior é a concordância entre os modelos. Portanto, comprova-se que os modelos estudados são satisfatoriamente concordantes. Isso devido, ao valor assumido para o índice “d” ser próximo de 1 (concordância perfeita), sendo este de 0,896.

Na Figura 6 é apresentado o gráfico do índice de área foliar para os modelos observado *versus* simulado, durante o ciclo da cultura.

Figura 6 - Comparação entre os modelos STELLA e Experimental.



Fonte: Autora (2023).

No início da frutificação (49 DAT) obteve-se para a mesma lâmina irrigada, o IAF de 1,64. Tais valores foram mensurados em campo. Já para o IAF simulado aos 49 DAT, o valor obtido na lâmina de 100% ETc foi de 1,54. Ao início da colheita, o IAF simulado foi de 2,24 e o valor mensurado foi de 2,19, ambos considerando a lâmina de 100% ETc. O r^2 encontrado foi de 75,5%, indicando que houve dispersão entre os valores preditos e observados.

O valor previsto para o índice de área foliar do pimentão irrigado no modelo do STELLA foi de 2,32, próximo ao resultado encontrado em campo de 2,35, ambos correspondentes a maior lâmina aplicada até os 98 DAT; cujos resultados foram estatisticamente iguais. Assim, o modelo construído a partir do software STELLA foi capaz de estimar a mudança dinâmica do índice de área foliar, conforme apresentado na Figura 6.

4. DISCUSSÃO

O pimentão é uma cultura de colheita múltipla. Ou seja, pode ser colhida várias vezes da mesma planta durante o ciclo de produção. Por ser uma espécie encontrada em climas tropicais, é dependente da temperatura. Sua temperatura base é de 10°C (GUAYMASÍ et al., 2018), e em temperaturas mais baixas, o crescimento é paralisado.

Segundo Guaymasí et al. (2018) o pimentão responde à soma térmica acumulada e o ciclo da cultura está associado à quantidade de graus-dia para cada estágio de desenvolvimento, como observado na Tabela 5. Os valores de GDA encontrados neste estudo foram próximos aos

valores obtidos por Carvalho, Oliveira e Pereira (2011) para a cultura do pimentão. Os autores obtiveram 244 GDA até o início da floração e 1116 GDA até os 149 DAT. Assim, a importância que a temperatura exerce sobre o ciclo da cultura está relacionada a duração do ciclo, em que o aumento ou a diminuição da temperatura até atingir uma faixa ideal, poderá abreviar ou aumentar os dias de cultivo (INFELD; SILVA; ASSIS, 1998).

A aplicação de diferentes lâminas irrigadas influenciou estatisticamente a resposta do pimentão em relação ao desenvolvimento foliar. Neste estudo foi observado que as maiores lâminas irrigadas associadas ao maior período de desenvolvimento cultural, tanto em dias como em função de graus-dias, resultaram em maiores valores de índice de área foliar (Figura 5). Isso pode ser explicado pela resposta das plantas ao déficit hídrico. Pois, de acordo com Taiz et al. (2017) a primeira reação e a mais proeminente das plantas em relação ao déficit é a limitação na área foliar, afetando conseqüentemente o índice de área foliar.

O maior valor obtido para o índice de área foliar até os 98 DAT foi de 2,35 (Figura 6), sendo este valor superior ao encontrado por Carvalho, Oliveira e Pereira (2011), que obtiveram o IAF de 1,6 até os 154 DAT para a cultura do pimentão considerando diferentes condições de clima e manejo. Em contrapartida, Casais et al. (2018) obtiveram um IAF de 1,59 até os 60 DAT no cultivo do pimentão em ambiente protegido, considerando a lâmina de 100% ETc.

Ademais, considerando que a variação do índice de área foliar também está relacionada a densidade de plantio e que neste estudo foi utilizado o espaçamento adensado de 0,3 m entre plantas. Quando comparado com os resultados obtidos por Silva et al. (2010), observa-se uma similaridade com os valores do IAF associados ao espaçamento da cultura. Os autores obtiveram índices de área foliar até os 98 DAT para a cultura do pimentão de 3,45; 2,65; 2,48 e 1,87 para os respectivos espaçamentos entre plantas: 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 m. Logo, é possível afirmar que maiores densidades de plantio resultam em menores índices de área foliar (SILVA et al., 2010). Além de que, o IAF também está relacionado a interceptação da radiação e assimilação de CO₂, e conseqüentemente a deficiência hídrica (MULLER et al., 2005).

Por fim, os resultados encontrados no item 3.4 (Tabela 6) deste trabalho demonstraram que o modelo desenvolvido com o auxílio do software STELLA é capaz de estimar o índice de área foliar durante o ciclo da cultura. Portanto, é possível obter um panorama futuro do desenvolvimento foliar para a cultura do pimentão a partir da simulação dinâmica, sendo uma informação útil na gestão da produção agrícola

5. CONCLUSÕES

O modelo construído foi útil na previsão do índice de área foliar do pimentão irrigado.

É possível estimar o índice de área de foliar do pimentão considerando o acúmulo de graus-dias, para o modelo de simulação dinâmica em campo aberto.

O IAF simulado até os 98 DAT foi de 2,32 m²/m².

A aplicação de menores lâminas irrigadas influenciou negativamente na resposta do índice de área foliar.

6. REFERÊNCIAS

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, A. D. DE; PEREIRA, J. B. A. Ajuste de modelos para estimativa do índice de área foliar e acúmulo de biomassa do pimentão em função de graus-dias. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 3, p. 971-982, 2011.

CASAI, L. K. N. et al. Índices morfofisiológicos e produção de pimentão produzido em diferentes substratos a base de resíduos orgânicos em ambiente protegido. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 1, p. 174-190, 2018.

CHARLES-EDWARDS, D. A. et al. **Physiological determinants of crop growth**. Sydney: Academic Press, 1982.

COSTANZA, R.; VOINOV, A. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III. **Ecological Modelling**, v. 143, n. 1-2, p. 1-7, 2001.

FERNEDA, Brena Geliane et al. Graus-dias na estimativa das taxas de crescimento de quatro cultivares de soja em diferentes épocas de plantio. **Nativa**, v. 4, n. 3, p. 121-127, 2016.

FERRARI, E.; PAZ, A. DA; SILVA, A. C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Nativa**, Sinop, v. 3, n. 1, p. 67-77, 2015.

GUAYMASÍ, D. V. et al. Days and termal time to flowering and fructification of solanaceae crops cultivated under greenhouse in La Plata. **Horticultura Argentina**, v. 37, 2018.

INFELD, J. A.; SILVA, J. B. da.; ASSIS, F. N. de. Temperatura-base e graus - dia durante o período vegetativo de três grupos de cultivares de arroz irrigado. **Revista Brasileira Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 187-191, 1998.

ISEE SYSTEMS (2023). **SYSTEMS THINKING IN EDUCATION**. Acessado em 15 de maio de 2023. Disponível em: <https://www.iseesystems.com>.

ISLER, P. R.; DE OLIVEIRA FLORENTINO, H.; MARTINS, D. Modelagem matemática de aferições de temperatura com aplicação em graus-dias para cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, v. 27, n. 3, p. 97-114, 2012.

LOPES, J. S. et al. Ajuste de modelos para descrever a fitomassa seca da parte aérea da cultura do milho em função de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 73-80, 2005.

MIRANDA, E. P. DE et al. Uso do programa stella no manejo da irrigação do meloeiro. **Irriga**, p. 159-167, 2014.

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

RENATO, N. DOS S. et al. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 382-388, 2013.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G., ALVAREZ V., V.H. **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5a Aproximação**. Viçosa, MG. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p.43-60, 1999.

SILVA, P. I. B. et al. Crescimento de pimentão em diferentes arranjos espaciais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 45, p. 132-139, 2010.

SOLTANI, A., SINCLAIR, T. R. **Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield**. CABI, 1 ed., 2012, 340 p.

SOUZA, A. P. DE; LEONEL, S.; SILVA, A. C. DA. Temperatura basal e soma térmica em fases fenológicas de cultivares de nectarineira e pessegueiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1588-1596, 2011.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

TAPIA, E. M. et al. Use of Stella Software for the modelling of climate change impacts on water balance for the Rio Yaqui Basin, Sonora, Mexico. **European Scientific Journal**, v. 10, n. 14, 2014.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CONCLUSÕES GERAIS

O modelo construído baseado na dinâmica de sistemas foi útil na simulação da massa seca das plantas e na previsão do índice de área foliar.

A eficiência do uso da radiação calibrada no modelo foi de $2,4 \text{ g MJ}^{-1}$ para as condições de campo.

O coeficiente de extinção do dossel calibrado no modelo foi de 0,75 considerando as condições de cultivo em campo aberto.

O teor de água no solo foi estabelecido diariamente a partir da sub-rotina Balanço Hídrico.

O modelo foi validado considerando as condições ambientais em campo aberto.

A diferença na lâmina irrigada não afetou a resposta da massa seca dos frutos e do caule. Em contrapartida, com maiores lâminas irrigadas houve um aumento na massa seca de folhas e de raízes.

O modelo simulou com exatidão a massa seca dos constituintes da planta e o índice de área foliar.

REFERÊNCIAS

- ABAYOMI, Y. A. et al. Effects of soil moisture contents and rates of NPK fertilizer application on growth and fruit yields of pepper (*Capsicum* spp.) genotypes. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 2, n. 7, p. 651–663, 2012.
- ABD EL BAKI, H. M. et al. A new scheme to optimize irrigation depth using a numerical model of crop response to irrigation and quantitative weather forecasts. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 150, n. February, p. 387–393, 2018.
- 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 Nigeria, West Africa. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 225-234, 2017.
- BAUMHARDT, R. L. et al. Modelling irrigation management strategies to maximize cotton lint yield and water use efficiency. **Agronomy Journal**, p. 101, 460-468. 2009.
- COLAK, Y. B. Leaf water potential for surface and subsurface drip irrigated bell pepper under various deficit irrigation strategies. **Chilean journal of agricultural research**, v. 81, n. 4, p. 491-506, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392021000400491>
- FERNEDA, Brena Geliane et al. Graus-dias na estimativa das taxas de crescimento de quatro cultivares de soja em diferentes épocas de plantio. **Nativa**, v. 4, n. 3, p. 121-127, 2016.
- FODOR, N. et al. Integrating Plant Science and Crop Modeling: Assessment of the Impact of Climate Change on Soybean and Maize Production. **Plant and Cell Physiology**, v. 58, n. 11, p. 1833–1847, 2017.
- FOSTER, T. et al. AquaCrop-OS: An open-source version of FAO's crop water productivity model. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 18–22, 2017.
- FREITAS, JOHERLAN CAMPOS DE. **Calibração do modelo AquaCrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais**. 2017. 119f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/2380>
- KOLENC, Z. et al. Hop (*Humulus lupulus* L.) response mechanisms in drought stress: Proteomic analysis with physiology. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 105, p. 67–78, 2016.
- KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 130, p. 14-26, 2013.
- LEARY, G. J. O. et al. Response of wheat growth , grain yield and water use to elevated CO₂ under a Free-Air CO₂ Enrichment (FACE) experiment and modeling in a semi-arid environment. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2670–2686, 2015.

MIRSAFI, Z. S. et al. Assessment of AquaCrop model for simulating growth and yield of saffron (*Crocus sativus* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 211, p. 343-351, 2016.

MONTOYA, F. et al. Evaluation of AquaCrop model for a potato crop under different irrigation conditions. **Agricultural Water Management**, v. 164, part. 2, p. 267-280, 2016.

OUYANG, Y. et al. A STELLA Model to Estimate Water and Nitrogen Dynamics in a Short-Rotation Woody Crop Plantation. **Journal of Environment Quality**, v. 44, n. 1, p. 200, 2014.

PARIZI, A. R. C. et al. Corn yield under various simulated irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 503–514, 2016.

SHAMMOUT, M.W.; QTAISHAT, T.; RAWABDEH, H.; SHATANAWI, M. Improving Water Use Efficiency under Deficit Irrigation in the Jordan Valley. **Sustainability**, v. 10, n. 11, p. 4317, 2018. DOI - <https://doi.org/10.3390/su10114317>

SILVA, A. C. B. DA., OLIVEIRA, F. G., BRAGA, R. N. DA F. G. P. Yield prediction in banana (*Musa* sp.) using STELLA model. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 45, e58947, p. 1-13, 2023. DOI - <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.58947>

TAO, F. et al. Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertainty in climate change impact assessments. **Global Change Biology**, v. 24, n. 3, p. 1291–1307, 2018.

YAHAYA, O.; ALAO, F.; ODIGIE, C.J. Yield, crop-water-use evaluation for pepper production under irrigated cultivation in Akure, Nigeria. **Global Journal of Science Frontier Research Agriculture & Biology**, v. 12, n. 1, p. 18-22, 2012.