RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 14/12/2023.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO.

Wenderson Nonato Ferreira da Conceição

Engenheiro Agrônomo

Jaboticabal-SP
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO.

Wenderson Nonato Ferreira da Conceição

Orientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Campus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

Jaboticabal-SP
2022

C744c

Conceição, Wenderson Nonato Ferreira da
Calibração, teste e aplicação do modelo aquacrop para a cultura do feijão sob regimes de irrigação / Wenderson Nonato Ferreira da Conceição. -- , 2023
61 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal,
Orientador: Rogério Teixeira de Faria

1. Feijão. 2. Irrigação. 3. Modelagem de Culturas. 4. Software Aquacrop. 5. Simulação Agrícola. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO

AUTOR: WENDERSON NONATO FERREIRA DA CONCEIÇÃO
ORIENTADOR: ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA (Participaçao Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciencias Exatas DECEx / FCAV UNESP Jaboticabal

Prof. Dr. GEFFSON DE FIGUEREDO DANTAS (Participaçao Virtual)
UNIARA / Araquara/SP

Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 14 de dezembro de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Wenderson Nonato Ferreira da Conceição – Brasileiro, nascido em 17 de setembro de 1997, natural de Belém, Pará, filho de Raimundo Nonato Amoras da Conceição e Dicilene Ferreira da Conceição. Cursou engenharia Agronômica na Universidade Federal Rural da Amazônia, Campus Belém, em Belém – PA, de 2015 a 2020. Bolsista de iniciação científica pela PIBIC/UFRA de 2018 a 2019, atuando principalmente nos temas: irrigação e manejo. Durante a graduação fez parte do Grupo de Pesquisa em nutrição da palma de óleo (NUTRIPALMA) e do grupo de Pesquisa Ciência e Tecnologia em Sistema de Produção de Frutíferas na Amazônia (SIFRUTAM). Em agosto de 2020, ingressou no curso de mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (UNESP/FCAV), no Campus de Jaboticabal – SP, na área de pesquisa de Modelos de Simulação. Em maio de 2022, ingressou no MBA em agronegócio pela Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", unidade da Universidade de São Paulo (USP).

Pois Dele, por Ele e para Ele são
todas as coisas. A Ele seja a
glória para sempre! Amém.
Romanos 11:36

Dedico

A Deus, por toda sua misericórdia e graça sobre minha vida. Aos meus pais Raimundo Nonato Amoras da Conceição e Dicilene Ferreira da Conceição por todo apoio, carinho e amor. A minha esposa Tinayra Teyller Alves Costa que é minha fonte de motivação e que me ajudou nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado o dom da vida, pela sua graça e misericórdia que permitiu chegar a essa ocasião.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria, pelo direcionamento, oportunidade de trabalhar junto a ele, ensinamentos, paciência, respeito e compreensão dos momentos difíceis que enfrentei.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, Profs. Drs. Eduardo Pinheiro de Freitas, Rivanildo Dallacorte, Geffson de Figueredo Dantas e Leandro Borges Lemos, pela disponibilidade de participar e pelas contribuições acerca deste trabalho de dissertação.

A Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo –, pela formação acadêmica e oportunidade de realização do curso de mestrado.

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

Aos engenheiros agrônomos e amigos que me ajudaram a construir este trabalho, em especial, ao Eng. e Mestre Igor Cristian de Oliveira Vieira, que sempre esteve disponível para ajudar nesta caminhada.

Aos meus pais, Raimundo Nonato Ferreira da Conceição e Dicilene Ferreira da Conceição que não mediram esforços para me derem incentivos para buscar uma formação acadêmica. A minha irmã Weveni Ferreira da Conceicao pelo apoio e incentivo para continuar.

A minha esposa Tinayra Teyller Alves Costa por todos os momentos em que esteve ao meu lado nessa trajetória, ajuda, conforto, amor e carinho, enfrentando todas as dificuldades ao meu lado.

A todos os demais familiares e amigos, que de alguma forma contribuíram nessa minha trajetória e na realização deste trabalho, compartilhando momentos que fazem a vida ter sentido.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

2.1 A Cultura do Feijão 3

2.2 Balanço Hídrico do Solo 6

2.3.O modelo AquaCrop 6

3. MATERIAL E MÉTODOS 13

3.1. Condições experimentais 13

3.2. Calibração, teste e aplicação. 16

4. RESULTADOS 19

4.1 Calibração do Modelo 19

4.2 Teste do Modelo 24

4.3 Armazenamento de água no Solo 28

4.4. Aplicação do Modelo 29

5. DISCUSSÃO 32

6. CONCLUSÕES 38

7. REFERÊNCIAS 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria e retenção de água do Latossolo Vermelho distrófico da área experimental.....15

Tabela 2. Coeficientes calibrados da cultivar IAPAR 57 de feijoeiro para o modelo AquaCrop**. **20

Tabela 3. Durações das fases vegetativa (V0 – R6), reprodutiva (R6 - R9) e do ciclo fenológico (V0 - R9) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) observadas e simuladas pelo modelo AquaCrop para o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração.**.....22

Tabela 4. Produtividade (Y, kg ha^{-1}), índice de colheita (HI) e biomassa final (Bf, kg ha^{-1}) simuladas pelo modelo AquaCrop e observadas para a cultivar IAPAR 57 sob o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Calibração**.....24

Tabela 5. Durações em DAS de fases vegetativa (V0 – R6), reprodutiva (R6 - R9) e ciclo fenológico (V0 - R9) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), observadas em campo e simuladas pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Teste.**.....25

Tabela 6. Produtividade (Y, kg ha^{-1}), índice de colheita (HI) e biomassa final (Bf), kg ha^{-1}) do feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) observadas e simuladas pelo modelo AquaCrop para o tratamento sem irrigação (T0) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). **Fase de Teste**.....28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolução da cobertura do dossel durante o ciclo de cultivo. CCo - cobertura inicial do dossel no momento da emergência da cultura, CGC - taxa de crescimento, CCx - cobertura máxima e CDC - coeficiente de declínio do dossel. Adaptado de Steduto et al. (2009). **.....**9

Figura 2. Fluxograma do modelo AquaCrop, indicando os principais componentes do contínuo solo-planta-atmosfera e os parâmetros da fenologia de transporte, cobertura do solo pelo dossel, transpiração, produção de biomassa e produção final (I - irrigação; Tn–temperatura mínima do ar; Tx – temperatura máxima do ar; ETo - evapotranspiração de referência; E - evaporação do solo; Tr– transpiração da cultura; gs - condutância estomática; WP- produtividade da água; HI - índice de colheita; CO2 - concentração de dióxido de carbono atmosférico; ES – escoamento superficial. (1), (2), (3), (4) - diferentes funções de resposta ao estresse de água). As linhas contínuas indicam ligações diretas entre as variáveis e os processos. As linhas tracejadas indicam retroalimentação. Fonte: Steduto et al. (2009).....12

Figura 3. Condições meteorológicas durante condução do experimento com feijoeiro (Cultivar IAPAR 57) estádios fenológicos (S: Semeadura; F: Floração; M: Maturação) em três épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto). 14

Figura 4. Cobertura do dossel e biomassa simulados pelo modelo AquaCrop e observadas para a cultivar IAPAR 57 sob o tratamento com irrigação plena (T1) nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Calibração.....23

Figura 5. Cobertura do dossel observada e simulada para a cultivar IAPAR 57 pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Teste. 26

Figura 6. Biomassa observada e simulada para a cultivar IAPAR 57 pelo modelo AquaCrop para os tratamentos não irrigado (T0) e irrigação deficitária (T2), nas semeaduras em 21/03 (E1), 24/04 (E2) e 23/08 (E3). Fase de Teste.....27

Figura 7. Armazenamento de água no solo na camada 0 - 35 cm observado (OBS) e simulado (SIM) pelo modelo AquaCrop para a cultivar de feijoeiro IAPAR 57, em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura. NI – Não irrigado; T2 - irrigação a ψ = - 25 kPa, T3 - irrigação a ψ = - 70 kPa, E1 -21/03, E2 - 24/04, E3 - 23/08, PMP- Ponto de Murcha Permanente, CC - Capacidade de Campo.....29

Figura 8. Produtividade de grãos, produtividade da água e lâmina de irrigação simuladas pelo modelo AquaCrop para feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura, durante o período 1980 – 2016. NI – Não irrigado, 200%RAW, 170%RAW, 120%RAW, 100%RAW e 50%RAW são depleções de 200,170, 120, 100 e 50% da água facilmente disponível na camada 0-35 cm. 31

Figura 9. Produtividade, precipitação ETo e irrigação simuladas pelo modelo AquaCrop para feijoeiro (Cultivar IAPAR 57), em função de estratégias de irrigação e épocas de semeadura, durante o período 1980 – 2016. NI – Não irrigado; 170%RAW, 120%RAW água facilmente disponível na camada 0- 35 cm. 32

CALIBRAÇÃO, TESTE E APLICAÇÃO DO MODELO AQUACROP PARA A CULTURA DO FEIJÃO SOB REGIMES DE IRRIGAÇÃO.

RESUMO – A irrigação é essencial para a cultura do feijão em regiões com deficiência hídrica, pois proporciona suprimento hídrico adequado para atingir seu potencial produtivo. Modelos de simulação de crescimento de culturas relacionam os componentes solo-água-planta-atmosfera para estimar o desenvolvimento e a produtividade das plantas em diferentes cenários, possibilitando indicar estratégias eficientes de irrigação. Para serem aplicados, os modelos requerem testes com dados independentes, após calibração de alguns coeficientes de cultura. O objetivo deste trabalho foi: a) calibrar coeficientes de cultura e testar a capacidade do modelo AquaCrop em simular fenologia, crescimento e produtividade de uma cultivar de feijão (IAPAR 57) sob três regimes hídricos (T0 – sem irrigação, T1 – irrigação plena e T2 - irrigação deficitária) e três épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto), e b) determinar estratégias eficientes de irrigação para a cultura do feijão em Londrina, PR. A calibração dos coeficientes da cultivar IAPAR 57 foi bem-sucedida possibilitando bom desempenho do modelo para simular a fenologia, crescimento do dossel e biomassa, e produtividade nos três regimes hídricos, durante os períodos de cultivo com temperaturas adequadas (E1 e E3). No período em que predomina temperaturas abaixo do ideal para a cultura (≤17ºC), como em E2, associadas com irrigação deficitária ou sem irrigação, o modelo não penaliza adequadamente os estresses térmico e hídrico combinados, mesmo ajustando os coeficientes de estresse para estas condições, resultando em superestimativa do crescimento e produtividade da cultura. Portanto, falta ao modelo AquaCrop estender o efeito de estresse por frio, não apenas para o período de polinização, mas também para os outros períodos críticos, a fim de representar a desfolha do dossel ou mesmo a morte da planta. Nas simulações de longo período, o modelo foi capaz de calcular a variabilidade da produtividade devido às incertezas na precipitação ao longo dos anos e indicar estratégias de irrigação para Londrina, PR (irrigações após depleções de 120 e 170% da água facilmente disponível, para semeaduras em março e setembro, respectivamente) visando atingir altas produtividades da cultura (>2.769 kg ha^{-1}) e produtividades de água (1.050 a 1.445 kg m^{-3}), com a aplicação de lâminas

intermediárias (<150 mm). Embora haja necessidade de melhoria do cálculo de penalização por estresse térmico, o modelo AquaCrop tem boa capacidade para ser utilizado em estudos e aplicações em que regimes hídricos são limitantes à produção da cultura.

Palavras-chave: fração de cobertura, manejo de irrigação, modelagem agrícola, produtividade

CALIBRATION, TEST AND APPLICATION OF THE AQUACROP MODEL FOR CROPPING BEANS UNDER IRRIGATION SYSTEMS.

ABSTRACT – Irrigation is essential for bean cultivation in regions with water deficit, as it provides adequate water supply to reach its productive potential. Crop growth simulation models relate the soil-water-plant-atmosphere components to estimate the development and productivity of plants in different scenarios, making it possible to indicate efficient irrigation strategies. To be applied, the models require tests with independent data, after calibration of some crop coefficients. The objective of this work was: a) to calibrate crop coefficients and test the ability of the AquaCrop model to simulate phenology, growth and productivity of a common bean cultivar (IAPAR 57) under three water regimes (T0 - no irrigation, T1 - full irrigation and T2 - poor irrigation) and three sowing dates (E1 – March 21st, E2 – April 24th and E3 – August 23rd), and b) determine efficient irrigation strategies for bean crops in Londrina, PR. The calibration of the coefficients of the IAPAR 57 cultivar was successful, allowing good performance of the model to simulate the phenology, canopy and biomass growth, and productivity in the three water regimes, during the cultivation periods with adequate temperatures (E1 and E3). In the period in which suboptimal temperatures prevail for the crop (≤17ºC), as in E2, associated with poor irrigation or no irrigation, the model does not adequately penalize the combined thermal and water stress, even adjusting the stress coefficients for these conditions, resulting in overestimation of crop growth and productivity. Therefore, the AquaCrop model lacks to extend the effect of cold stress, not only to the pollination period, but also to the other critical periods, in order to represent canopy defoliation or even plant death. In long-term simulations, the model was able to calculate productivity variability due to uncertainties in precipitation over the years and indicate irrigation strategies for Londrina, PR (irrigations after depletions of 120 and 170% of easily available water, for sowing in March and September, respectively) aiming to achieve high crop yields (>2,769 kg ha^{-1}) and water yields (1,050 to 1,445 kg m^{-3}), with the application of intermediate depths (<150 mm). Although there is a need to improve the calculation of the thermal stress penalty, the AquaCrop model has good capacity to be used in studies and applications in which water regimes are limiting to crop production.

Keywords: canopy cover, irrigation management, agricultural modeling, productivity.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico de forma exponencial nos últimos anos demanda maior quantidade de alimentos e causa pressões ambientais pela necessidade de novas fronteiras agrícolas e incremento na utilização de recursos hídricos. Este cenário pressiona governantes a adotarem políticas públicas voltadas à utilização consciente dos recursos naturais, especialmente a água, uma vez que esse recurso é primordial e afeta diretamente a produção agrícola (Fagundes et al., 2020). O Brasil ocupa a sexta posição no ranking mundial de países com áreas irrigadas, com 8,2 milhões de hectares (FAO,2020), e sua área irrigada vêm aumentando significativamente nos últimos anos.

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é amplamente consumido no Brasil e no mundo. O Brasil situa-se entre os maiores produtores de feijão, com grande parte da produção destinada ao consumo interno, sendo o estado do Paraná o maior produtor nacional (CONAB, 2021).

O cultivo de feijão é realizado em grande parte por pequenos agricultores e é distribuído por todo o território durante três épocas distintas, “feijão das águas” na primavera, “feijão da seca” no outono e “feijão de inverno” no inverno, o que favorece a oferta ao longo do ano (Coêlho, 2018).

O feijoeiro é bastante sensível às condições ambientais adversas, sendo os fatores térmico e hídrico primordiais para o crescimento da cultura. Temperaturas fora do intervalo considerado ótimo (17°C a 25°C) podem impactar a floração, formação de vagens, e massa e número de sementes. A ocorrência de geada impacta diretamente o número de vagens e reduz a produtividade em razão do abortamento dos grãos. Altas temperatura, associadas com umidade do ar acima de 70%, são propensas ao aparecimento de doenças (Heinemann et al., 2009).

A deficiência hídrica reduz a população de plantas e causa abscisão de flores, polinização deficiente e menor número e massa de vagens e sementes, resultando em baixa produtividade, quando ocorre durante os períodos críticos que são a semeadura, florescimento, formação de vagens e enchimento de grãos (Faria, 1989;

Oliveira et al., 2018). O uso da irrigação na cultura do feijão é fundamental em áreas sobre deficiência hídrica, pois supre a necessidade hídrica durante o ciclo de cultivo, possibilitando atingir o seu potencial produtivo, além de permitir o cultivo em diversas épocas do ano. O estresse hídrico na cultura do feijão, dependendo do estágio fenológico em que acontece, reduz em até 75% a produtividade relativa de grãos, gerando prejuízos ao agricultor (Oliveira et al., 2018). Para as condições do Paraná, durante 8 anos de experimentação, (Faria, 1989) encontrou alta correlação (R^2 = 0,65) entre produtividade de feijoeiro e número de dias de déficit hídrico no período entre 10 dias antes e após o florescimento.

A quantificação do decréscimo de produtividade devido aos fatores climáticos, particularmente a variabilidade interanual da precipitação, é fundamental para se avaliar o risco da cultura em função da deficiência hídrica e se a irrigação é viável economicamente. A obtenção desses conhecimentos requer a condução de experimentos de campo durante vários anos, o que é muito custoso e demorado (Raes et al., 2012). Como alternativas, apresentam-se os modelos de crescimento de cultivos como ferramentas altamente eficientes e de baixo custo, para quantificar as respostas de uma ampla gama de culturas à restrição hídrica e à irrigação.

A utilização de modelos de crescimento de cultivos possibilitam realizar testes prévios antes de ir para o campo, reduzindo os custos com mão de obra e tempo (Steduto et al., 2009). Possibilitam ainda simulações ao longo de séries meteorológicas históricas existentes no local de interesse, visando determinar riscos e respostas de culturas aos diferentes manejos de irrigação.

Na literatura são disponíveis modelos já testados em larga escala para quantificar a produtividade de várias culturas, sob regimes hídricos diversos, visando avaliar a sua resposta à irrigação, a exemplo do modelo CSM- CROPGRO-Drybean do sistema DSSAT (Hoogenboom, et al,2019), em estudos conduzidos por Faria et al.(1997) e Oliveira et al. (2012) . Grande parte dos modelos incluem coeficientes de cultura como entrada, sendo, em sua maioria, difíceis de medir ou estimar (Ran et al., 2017), o que torna restrito o uso desses modelos (Jones et al., 2017).

O Modelo AquaCrop foi concebido pela FAO - Food and Agricultural Organization para ser um aplicativo menos complexo, que utiliza uma quantidade reduzida e intuitiva de coeficientes de entrada (Steduto et al., 2009), e concilia facilidade no uso, eficiência e robustez (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2012. O AquaCrop visa à comunidade técnico-cientifica, podendo ser utilizado por estudantes, extensionistas e especialistas em políticas públicas (Steduto et al., 2009).

No modelo AquaCrop as características de uma dada cultivar são representadas por parâmetros ou coeficientes que representam as suas características morfológicas, fenológicas e fisiológicas, a fim de simular o crescimento e desenvolvimento da cultura. Em virtude de cada cultivar estudada apresentar variabilidade genética e, consequentemente, distinção da cultivar padrão, há necessidade de calibração do modelo, que consiste em ajustar esses coeficientes para que as simulações se aproximem dos valores observados. Esse procedimento é realizado interativamente até que o resultado esteja dentro de uma faixa aceitável de erro.

O objetivo deste trabalho foi: a) calibrar e testar a capacidade do modelo AquaCrop em simular o crescimento e produtividade da cultura do feijão, cultivar IAPAR 57, sob estratégias de irrigação (T0 – sem irrigação, T1 – irrigação plena e T2 - irrigação deficitária) e épocas de semeadura (E1 – 21 de março, E2 – 24 de abril e E3 – 23 de agosto), e b) aplicar o modelo em simulações de longo período para determinar melhores estratégias de manejo de irrigação para o município de Londrina, Paraná, Brasil.

6. CONCLUSÕES

A calibração dos coeficientes da cultivar IAPAR 57 foi bem-sucedida possibilitando bom desempenho do modelo para simular a fenologia, crescimento do dossel e biomassa, e produtividade nos três regimes hídricos, durante os períodos de cultivo com temperaturas adequadas (E1 e E3).

No período em que predomina temperaturas abaixo do ideal para a cultura (≤17ºC), como em E2, associadas com irrigação deficitária ou sem irrigação, o modelo não penaliza adequadamente os estresses térmico e hídrico combinados, mesmo ajustando os coeficientes de estresse para estas condições, resultando em superestimativa do crescimento e produtividade da cultura. Portanto, falta ao modelo AquaCrop estender o efeito de estresse por frio, não apenas para o período de

polinização, mas também para os outros períodos críticos, a fim de representar a desfolha do dossel ou mesmo a morte da planta.

Nas simulações de longo período, o modelo foi capaz de calcular a variabilidade da produtividade devido às incertezas na precipitação ao longo dos anos e indicar estratégias de irrigação para Londrina, PR (irrigações após depleções de 120 e 170% da água facilmente disponível, para semeaduras em março e setembro, respectivamente) visando atingir altas produtividades da cultura (>2.769 kg ha^{-1}) e produtividades de água (1.050 a 1.445 kg m^{-3}), com a aplicação de lâminas intermediárias (<150 mm).

Embora haja necessidade de melhoria do cálculo de penalização por estresse térmico, o modelo AquaCrop tem boa capacidade para ser utilizado em estudos e aplicações em que regimes hídricos são limitantes à produção da cultura.

7. REFERÊNCIAS

Adams, J. E.; ARKIN, G. F.; RITCHIE, J. T. Influence of row spacing and straw mulch on first stage drying. **Soil Sci. Soc**. Am. J. 40, 436-442, 1976.

Allen, R. G.; pereira, L. S.; raes, D.; smith, M. **Crop Evapotranspiration: Guidelinesfor computing crop water requirements. Rome:FAO**, 1998. 300p.(Irrigation and Drainage Paper,56).

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014

Andrade, M. J. B.; Oliveira, D. P.; Figueiredo, M. A.; Martins, F. A. D. Exigências edafoclimáticas. In: Carneiro, J. E.; Paula Júnior, T. J.; Borém, **A. Feijão: do plantio a colheita**. 1 ed. UFV (Viçosa): UFV, 2015. Capítulo 4, p. 67-95.

Bertoldo, J. G., Pelisser, A., Silva, R. P., Favreto, R., Radin, B. Sensibilidade de genótipos de feijão ao estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 36-50, 2019.

Brouwer, R.; De Wit, C. T. A simulation model of plant growth with special attention to root growth and its consequences. **IBS**, 1968.

Chibarabada, T. P.; Modi, A. T.; Mabhaudhi, T. Calibration and testing of AquaCrop for

groundnut (*Arachis hypogaea*) and dry bean (*Phaseolus vulgaris*). **Water use and nutritional water productivity of selected major and underutilised grain legumes**, p. 138, 2018.

Chibarabada, T. P.; Modi, A. T.; Mabhaudhi, T. Calibration and evaluation of aquacrop for groundnut (*Arachis hypogaea*) under water deficit conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 281, p. 107850, 2020.

Coêlho, J. D. Produção e Grãos – Feijão, Milho e Soja. 2018.

Coêlho, J. D. Feijão: Produção e mercados. 2021.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento, 2021. *Relatório da safra brasileira de feijão*, 2021.

Conceição, C. G. D. **Estimativa da produção da cultura do milho irrigado através de simulação com o modelo AquaCrop e determinação da lâmina ótima econômica**. 2021. Doctoral dissertation. Universidade Federal de Santa Maria.

Costa, M. S., Mantovani, E. C., de Jesus, F. L. F., Sanches, A. C., da Silva, J. L. B., de Oliveira Santos, J. Uso do software AquaCrop para simular a resposta do feijão à diferentes regimes de irrigação. **IRRIGA**, v. 1, n. 3, p. 557-572, 2021.

Coorevits, L. **Calibration and validation of green beans for the AquaCrop model**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos) –Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

De Wit, C.T. Photosynthesis of leaf canopies. Pudoc, Wageningen, **Agricultural Research Reports** no. 663. 64 p. 1965.

Doorenbos, J.; Kassam, A. H**. FAO irrigation and drainage paper No. 33 "Yield response to water"**. FAO–Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1979.

Espadafor, M. et al. Simulation of the responses of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation. **Transactions of the ASABE**, v. 60, n. 6, p. 1983-1994, 2017.

Fagundes, O. S., Oliveira, L. C. A., Yamashita, O. M., Silva, I. V., Carvalho, M. A. C., Rodrigues, D. V. The water crisis and its implications in Brazilian agribusiness: a bibliographic review**. Scientific Electronic Archives**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 42, 3 jan. 2020. Scientific Electronic Archives. .

FAO – **Food and Agriculture Organization of the United Nations - Information system on water and agriculture** – AQUASTAT. 2020. Disponível em: https://www.fao.org/aquastat/en/. Acesso em: 18 out 2021.

FAO, I., **The State of Food Security and Nutrition in the World 2021**, FAO.

Disponível em: https://www.fao.org/3/cb4474en/online/cb4474en.html . Acesso: 06 de Maio de 2022. CID: 20.500.12592/p0dx35.

Faria, R. T. Irrigação, in: O feijão no Paraná. Londrina, IAPAR, Circular n. 63, 1989.

Faria, R. T., Folegatti, M. V., Frizzone, J. A., & Saad, A. M. Determination of a long-term optimal irrigation strategy for dry beans in Parana State, Brazil. **Scientia Agricola,** v. 54, p. 155-164, 1997.

Fernández, F.; Gepts, P.; López, M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. CIAT - Centro Internacional de Agricultura Tropical.Cali, Colombia.CIAT. 1983. 18p.

Freitas, Fábio de Oliveira. Evidências genético-arqueológicas sobre a origem do feijão comum no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online]. 2006, v. 41, n. 7 , pp. 1199-1203. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000700018>

Genuchten, M.Th. Van & Nielsen, D.R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsatured soils. **Ann. Geoph**., 3:615-628, 1985

Guimarães, C.M.; Stone, L. F.; Brunini, O. Adaptação do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 70-75, 2006.

Hadebe, S. T., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2017). Calibration and testing of AquaCrop for selected sorghum genotypes. **Water SA**, 43(2), 209-221.

Heinemann, A. B.; Stone, L. F.; Silva, S. C. Cultivos Temporários: Feijão. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Organizador). **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília – DF: INMET, 2009. p. 183-203

Hoogenboom, G., & Porter, C. H. The DSSAT crop modeling ecosystem. In: p.173-216 [K.J. Boote, editor] **Advances in Crop Modeling for a Sustainable Agriculture.** Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, United Kingdom. 2019. http://dx.doi.org/10.19103/AS.2019.0061.10

Hoffmann Júnior, L., Ribeiro, N. D., Rosa, S. S. D., Jost, E., Poersch, N. L., Medeiros, S. L. P.. Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1543-1548, 2007.

Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. **Agron. J**. 101, 448-459, 2009

Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. **Field Crops Research** 27, 337–350, 1991.

Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., ... & Wheeler, T. R. Brief history of agricultural systems modeling. **Agricultural systems**, v. 155, p. 240-254, 2017.

Juliatti, F. C., Moraes, S. A., Silva, H. D., & Borges, M. H. Seleção de progênies de feijoeiro F4 resistentes ao Bean Golden Mosaic Virus. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, p. 279-285, 2005.

Kanda, E. K.; Senzanje, A.; Mabhaudhi, T. Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). **Physics and Chemistry of the Earth,** Parts A/B/C, v. 124, p. 102941, 2021

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. **Agric. Water Manag**. 130, 14–26. 2013

Kim, D.; Kaluarachchi, J. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional Crop information. Agric. Water Manag. 149, 143–155, 2015.

Lima Filho, A. F., Coelho Filho, M. A., & Heinemann, A. B.. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no recôncavo baiano através do modelo CROPGRO. Rev. Bras. **Eng. Agríc. Ambient**. 17 (12), 1294–1300. 2013

Loague, K.; Green R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. **Journal of contaminant hydrology**, v. 7, n. 1-2, p. 51-73, 1991.

Lopes, P. M. S. **Metodologias de calibração e validação do modelo de simulação climática CLIGEN de apoio à modelação de perda de solo**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade de Évora.

Magalhães, I. D., Lyra, G. B., de Souza, J. L., Teodoro, I., da Rocha, A. E. Q., Cavalcante, C. A., ... & de Souza Ferraz, R. L. Performance of the AquaCrop model for bean ('Phaseolus vulgaris' L.) under irrigation condition. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 7, p. 1188-1196, 2019.

Masasi, B., Taghvaeian, S., Gowda, P. H., Marek, G., & Boman, R. Validation and application of AquaCrop for irrigated cotton in the Southern Great Plains of US. **Irrigation Science**, v. 38, n. 5, p. 593-607, 2020

Mabhaudhi, T., Modi, A. T., & Beletse, Y. G. Parameterisation and testing of AquaCrop for a South African bambara groundnut landrace. **Agron. J.** 106 243–251. 2014 https://doi.org/10.2134/ agronj2013.0355

Mkhabela, M. S.; Bullock, P. R. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. **Agricultural Water Management,** v. 110, p. 16-24, 2012.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. River Flow Forecasting through Conceptual Model. Part 1 - A Discussion of Principles. **Journal of Hydrology**, 10, 282-290. 1970

Nunes, H. G. G. C., Farias, V. D. S., Sousa, D. P., Costa, D. L. P., Pinto, J. V. N., Moura, V. B., ... & Souza, P. J. O. P. Parameterization of the AquaCrop model for cowpea and assessing the impact of sowing dates normally used on yield. **Agricultural Water Management**, v. 252, p. 106880, 2021.

Oliveira, E. C. D., Costa, J. M. N. D., Paula Júnior, T. J. D., Ferreira, W. P. M., Justino, F. B., & Neves, L. D. O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 239-246, 2012.

Oliveira, N. T., Gómez Masjuan, Y., Boicet Fabré, T., & Brown Manrique, O. Evaluación del modelo AquaCrop en condiciones de riego óptimo y deficitario en Phaseolus vulgaris. **Centro Agrícola**, v. 48, n. 2, p. 37-46, 2021.

Oliveira, L. F. C., Oliveira, M. D. C., Wendland, A., Heinemann, A., Guimarães, C., Ferreira, E. D. B., & Silveira, P. M. (2018). **Conhecendo a fenologia do feijoeiro e seus aspectos fitotécnicos. Santo Antônio de Goiás, GO**: Embrapa Arroz e Feijão.

Oteki, D. R. **Evaluation of Deficit Irrigation on Water Productivity and Yield Response of Beans Using AquaCrop in Eldoret, Kenya. 2015**. Doctoral dissertation. Moi University.

Parreira, A. G. B.; Marasca, I.; Solino, A. J. S.; Santos, G. O. Water balance climatological to the county of Rio Verde, Goiás. **Científica Multidisciplinary Journal**, 6(1), 16-33, 2019.

Paulilo M. T. S. **Capítulo 5**: Fotossíntese. In: Maria Terezinha Silveira Paulilo. **Fisiologia Vegetal**. Florianópolis: UFSC, 2015. p. 85.

Passos, M. L. V.; Zambrzycki, G. C.; Pereira, R. S. Balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Balsas-MA. **Scientia Agrária**, v. 18, n. 1, p. 83-89, 2017.

Prasad, P. V. V., Staggenborg, S. A., & Ristic, Z. **Impacts of Drought and/or Heat Stress on 689 Physiological, Developmental, Growth, and Yield Processes of Crop Plants, in: Ahuja, L.R., 690 Reddy, V.R., Saseendran, S.A., Yu, Q. (Eds**.), 2008. Advances in Agricultural Systems Modeling.

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. Crop water productivity. **Calculation procedures and calibration guidance. AquaCrop version 3.0**. FAO. Land and Water Development Division, Rome, 2009.

RAES, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. **Reference Manual AquaCrop** (Version 4.0). 2012.

Raes, D. Steduto, P. Hsiao, C. T. Fereres, E. Reference Manual, Chapter 1 – AquaCrop, Version 6.0 – 6.1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 2018.

Ran, H., Kang, S., Li, F., Tong, L., Ding, R., Du, T., ... & Zhang, X. (2017) Performance of AquaCrop and SIMDualKc models in evapotranspiration partitioning on full and deficit irrigated maize for seed production under plastic film-mulch in an arid region of China. **Agricultural Systems** 151:20-32.

Ran, H., Kang, S., Li, F., Du, T., Tong, L., Li, S., ... & Zhang, X. Parameterization of the AquaCrop model for full and deficit irrigated maize for seed production in arid Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 203, p. 438-450, 2018.

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.

Silva, A. C. S. L. **Consumo hídrico e calibração/validação do modelo AquaCrop para a cultura do feijão caupi cultivado no semiárido do nordeste do Brasil**. 2019. Tese de doutorado.

Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E. On the conservative behavior of biomass water productivity. **Irrigation Science**, v. 25, n. 3, p. 189-207, 2007.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., Fereres, E., 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agron. J.** 101, 426-437.

Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. **Crop yield response to water. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2012.

Tavares, T., Sousa, S., Salgados, F., Santos, G., Lopes, M., Fidelis, R. Adaptabilidade e estabilidade da produção de grão em feijão comum (*Phaseolus vulgaris*). **Revista de Ciências Agrárias,** v. 40, n. 2, p. 411-418, 2017.

Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review [online]** 38. Disponível: 10.2307/210739. Acesso: 28 de outubro. 2022.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R., 1955. The water balance. Publication in Climatology 8, **Laboratory of Climatology**, Centerton, N. J.

Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K., ... & Moreno, P. M. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 351-360, 2014

Vale, N. M., Barili, L. D., Rozzeto, D. S., Coimbra, J. L. M., Guidolin, A. F., & Köop, M. M. Avaliação para tolerância ao estresse hídrico em feijão. **Biotemas**, v. 25, n. 3, p. 135-144, 2012.

Vieira, C.; Júnior, T. J. P.; Borém, A. Feijão. Cap.4 – Exigências Edafoclimáticas. 2 ed. Viçosa: UFV -Universidade Federal de Viçosa, 2006. 600p

Villalobos, F. J., Fereres, E., 1990. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. **Agron. J.** 82, 1153-1159.

Wendland, A.; Lobo Júnior, M.; De Faria, J. C. Manual de identificação das principais doenças do feijoeiro-comum. 2018.

Zeleke, K. T.; Luchett, D.; Cowley, R.; Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1610-1618, 2011