

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**IRRIGAÇÃO DO TOMATE “GRAPE” EM CONDIÇÕES DE
SUBSTRATO POR MODELAGEM E SENSORES
ELETRÔNICOS**

Fabio Tayrone Oliveira de Freitas

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2023**

IRRIGAÇÃO DO TOMATE “GRAPE” EM CONDIÇÕES DE SUBSTRATO POR MODELAGEM E SENSORES ELETRÔNICOS

Fabio Tayrone Oliveira de Freitas

Engenheiro Agrônomo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2017
Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia –
UFRB, 2019

Tese apresentada ao Colegiado do Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola (Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

F886i

Freitas, Fabio Tayrone Oliveira de
Irrigação do tomate “grape” em condições de substrato
por modelagem e sensores eletrônicos / Fabio Tayrone
Oliveira de Freitas . _ Cruz das Almas, BA, 2023.
97.; il.

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da
Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas,
Doutorado em Engenharia Agrícola.

1. Recursos Hídricos. 2. Cultivo do Tomateiro 3. Agricultura
Irigada. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia,
Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 333.91

Ficha elaborada pela Biblioteca Universitária de Cruz das Almas - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Neubler Nilo Ribeiro da Cunha (*Bibliotecário - CRB5/1578*)
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE DOUTORADO**

**IRRIGAÇÃO DO TOMATE “GRAPE” EM CONDIÇÕES DE
SUBSTRATO POR MODELAGEM E SENSORES ELETRÔNICOS**

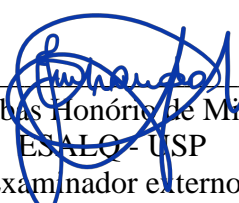
Comissão Examinadora da Defesa de Tese de
Fabio Tayrone Oliveira de Freitas

Aprovada em: 31/10/2023

Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano
(Orientador)

Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano
(Examinador externo)

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia -UFRB
(Examinador interno)


Dr. Jarbas Honório de Miranda
ESALQ - USP
(Examinador externo)

Dr. Everton Alves Rodrigues Pinheiro
Universidade Federal do Tocantins - UFT
(Examinador externo)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Amilton Lopes de Freitas e Jaidê Oliveira de Freitas, aos meus irmãos Jandson Fahel Oliveira de Freitas e João Felipe Oliveira de Freitas e a minha namorada/esposa Lilian Rosa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado saúde, paz, oportunidades de aprendizagem e entre outras coisas. Também agradeço aos meus pais, Jaide Oliveira de Freitas e Amilton Lopes de Freitas, pelos sacrifícios e esforços para me manterem financeiramente durante a graduação e pelos incentivos e apoio desde cedo, tendo consequência direta nas minhas conquistas.

Agradeço a minha namorada/esposa Lilian por todo o apoio dado durante essa jornada e pelos incentivos.

Agradeço a equipe técnica e funcionários do Núcleo de Engenharia de água e solo (NEAS), aos meus colegas e amigos que colaboraram com o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço ao professor Alisson Jadavi, pela amizade, por todo o apoio durante o ensino médio, mestrado e doutorado e pelo bom exemplo como orientador e pessoa, contribuindo bastante para minha formação pessoal e acadêmica.

Ao professor Tales Miler agradeço pela amizade e por todas as contribuições durante a graduação, mestrado e doutorado. Também aproveito para agradecer o professor Lucas Melo Vellame por todo o apoio.

Agradeço ao Núcleo de Engenharia de Água e solo (NEAS/UFRB) e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola (UFRB); A CAPES pela concessão da bolsa de estudo; E a FAPESB pelo apoio financeiro em equipamentos e infraestrutura para a elaboração da pesquisa científica.

Agradeço ao Instituto Federal Baiano Governador Mangabeira, pela estrutura e todo apoio fornecido para a execução do experimento.

Agradeço a Empresa Agristar pelo fornecimento das sementes de tomate "Grape".

Cordialmente,

Fabio Tayrone Oliveira de Freitas

IRRIGAÇÃO DO TOMATE “GRAPE” EM CONDIÇÕES DE SUBSTRATO POR MODELAGEM E SENSORES ELETRÔNICOS

RESUMO: Os substratos agrícolas e o solo, podem ser entendidos como um reservatório de água que pode ter o nível de armazenagem monitorado por sensores eletrônicos capazes de estimar o conteúdo de água (θ) ou potencial mátrico (Ψ) no solo/substrato. A modelagem agro-hidrológica permite simular variações de θ e Ψ a partir de informações das condições atmosféricas, das características das plantas e das propriedades hidráulicas do solo/substrato (PHS). O presente trabalho integra a modelagem ao sensoriamento de água no substrato (SAS). Diante disso, realizou-se o presente trabalho com objetivo de verificar se a produtividade da água do tomateiro varia em função da aplicação de diferentes faixas de potencial matricial de água no substrato e de investigar se as alterações das propriedades hidráulicas do substrato na zona radicular do tomateiro implicam em efeitos sobre o manejo da irrigação. Para realização da pesquisa, implantou-se um cultivo de tomate ‘grape’ no interior de uma casa de vegetação constituída por tela antiafídeo nas laterais e filme plástico na cobertura, sendo as plantas fertirrigadas por gotejamento automatizado. As plantas foram submetidas a duas faixas de Ψ utilizadas como referência para rotina de programação da irrigação: faixa 1, Ψ crítico superior igual a -6 kPa e Ψ crítico inferior igual a -40 kPa; e faixa 2, Ψ crítico superior igual -14 kPa e Ψ crítico inferior igual a -40 kPa. As faixas de Ψ foram aplicadas no manejo da irrigação de forma fixa durante todo ciclo de cultivo e de forma variada, alterando-se os limites críticos conforme a mudança da fase de desenvolvimento da planta. Os valores dos parâmetros hidráulicos da curva de retenção foram obtidos por modelagem inversa utilizando o modelo Hydrus 1D. O conteúdo de água no substrato ($\Theta_{\text{substrato}}$) foi monitorado por sensores GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) e TDR100 (Campbell Scientific, INC., Logan, Utah, USA). A evapotranspiração real da cultura foi determinada por lisímetros de pesagem. Simulações agro-hidrológicas foram realizadas para verificação dos efeitos das PHS determinadas antes (PHS_{ac}) e durante o cultivo (PHS_{dc}) sobre o manejo da irrigação. Percebeu-se não haver efeito significativo das faixas de Ψ na produtividade média do tomate “grape”, que foi de 2,2 kg planta⁻¹. Já a Prod_{água} foi estatisticamente superior para as plantas submetidas a faixa 2 em todo o ciclo da cultura, com valor de 37,10 kg m⁻³. A lâmina de irrigação calculada com os PHS_{ac} e PHS_{dc} proporcionaram RMSE de 0,4250 e 0,2336 L, respectivamente, quando comparado aos valores observados. Verificou-se mudanças nas PHS ao longo do ciclo da cultura, as quais implicaram em aumento da capacidade de retenção de água, água facilmente disponível e disponibilidade total de água no substrato. Tais mudanças nas PHS ao longo do ciclo da cultura influenciam o manejo de irrigação via SAS e a modelagem agro-hidrológica.

Palavras-chave: *Solanum lycopersicum* L., manejo da irrigação, modelagem agro-hidrológica, propriedades hidráulicas do substrato.

IRRIGATION OF “GRAPE” TOMATO UNDER SUBSTRATE CONDITIONS BY MODELING AND ELECTRONIC SENSORS

ABSTRACT: Agricultural substrates and soil can be understood as a water reservoir that can have the storage level monitored by electronic sensors capable of estimating the water content (θ) or matric potential (Ψ) in the soil/substrate. Agro-hydrological modeling allows the simulation of θ and Ψ variations based on information on atmospheric conditions, plant characteristics and soil/substrate hydraulic properties (SHP). The present study integrates modeling with substrate water sensing (SWS). In this context, the present study was carried out with the objective of checking whether tomato water productivity varies as a function of the application of different ranges of water matric potential in the substrate and to investigate whether changes in the hydraulic properties of the substrate in the root zone of tomato plants imply effects on irrigation management. To conduct the study, a ‘grape’ tomato plantation was established inside a greenhouse consisting of anti-aphid screen on the sides and plastic film on the top, and the plants were fertigated by automated drip. Tomato plants were subjected to two Ψ ranges used as a reference for irrigation scheduling routine: range 1, upper critical Ψ equal to -6 kPa and lower critical Ψ equal to -40 kPa; and range 2, upper critical Ψ equal to -14 kPa and lower critical Ψ equal to -40 kPa. The Ψ ranges were applied in the irrigation management in a fixed manner during the entire crop cycle and in a varied manner, changing the critical limits according to the change in plant development stage. The values of the hydraulic parameters of the soil-water retention curve were obtained by inverse modeling using the Hydrus 1D model. Water content in the substrate ($\Theta_{\text{substrate}}$) was monitored by GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) and TDR100 (Campbell Scientific, INC., Logan, Utah, USA) sensors. Actual crop evapotranspiration was determined by weighing lysimeters. Agro-hydrological simulations were carried out to assess the effects of SHP determined before cultivation (SHP_{bc}) and during cultivation (SHP_{dc}) on irrigation management. There was no significant effect of the Ψ ranges on the average yield of grape tomato, which was 2.2 kg plant⁻¹. On the other hand, water productivity was statistically superior for plants subjected to range 2 throughout the crop cycle, with a value of 37.10 kg m⁻³. The irrigation depth calculated with SHP_{bc} and SHP_{dc} generated RMSE of 0.4250 and 0.2336 L, respectively, when compared to the observed values. Changes in SHP were observed throughout the crop cycle, which resulted in increased water retention capacity, easily available water and total water availability in the substrate. Such changes in SHP throughout the crop cycle influence irrigation management via SWS and agro-hydrological modeling.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L., irrigation management, agro-hydrological modeling, substrate hydraulic properties.

SUMÁRIO

1- JUSTIFICATIVA	10
2- REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1- Cultivo do tomateiro (Solanum lycopersicum L.)	13
2.2- Produtividade da água	14
2.3- Manejo da irrigação por déficit hídrico (DH) e regulado (RDI)	15
2.4 Sensoriamento de água no solo/substrato (SAS).....	18
2.5- Propriedades físicas e hidráulicas de substratos agrícolas.....	20
2.6- Modelagem em sistemas agrícolas irrigados	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
CAPÍTULO I	39
PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO DO TOMATE GRAPE EM DIFERENTES FAIXAS DE POTENCIAL MÁTRICO	39
Introdução	42
Metodologia.....	44
Resultados	55
Discussão.....	60
Conclusões	62
Referências	63
CAPÍTULO II	67
VARIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO AFETA A MODELAGEM AGRO-HIDROLÓGICA E MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO TOMATEIRO	67
Introdução	70
Metodologia.....	72
Resultados e discussão	86
Conclusões	91
ReferênciaS	92
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97

1- JUSTIFICATIVA

Dentre os tipos de tomate disponíveis no mercado, o tomate grape ao longo dos anos tem-se tornado mais conhecido, devido ao sabor, coloração atraente, maiores teores de açúcares, maior tempo de prateleira e que podem ser consumidos in natura sem a necessidade de nenhum tipo de processamento (Chakma et al., 2021; Simonne et al., 2008).

O tomateiro é uma cultura que atrai grande incidência de pragas e doenças o que implica em preocupação constante dos produtores, fazendo com que os mesmos utilizem altas taxas de aplicação de defensivos químicos, tendo como principais consequências, o aumento do custo de produção, diminuição da qualidade do produto e oferta de possíveis riscos à saúde do trabalhador da lavoura e consumidor dos frutos. Os solos e substratos quando mantidos excessivamente úmidos favorecem o adoecimento do tomateiro. Dessa forma, faz-se importante o estudo de alternativas que possam diminuir a necessidade de aplicação de defensivos químicos e aumentar a produtividade e a qualidade do produto comercializável (tomate fruto). Uma das alternativas é o cultivo em ambiente protegido (casa de vegetação), pois possibilita o controle e a diminuição da entrada de pragas a partir da instalação de telas protetoras e das doenças devido a cobertura plástica e possibilita o controle da umidade do solo/substrato, sem interferência de chuva.

O cultivo de tomateiro em ambientes protegidos pode ser realizado diretamente no solo ou em vasos de cultivo. Sendo assim, a utilização da irrigação é imprescindível, pois irá suprir a perda de água evapotranspirada pela cultura, sendo na maioria das vezes empregada a irrigação localizada por gotejamento. A irrigação localizada pode ser realizada para formar uma faixa de molhamento contínua ou apenas um bulbo molhado em volta do sistema radicular da cultura.

Quando o cultivo do tomateiro é realizado em solo sob a condição de irrigação, o manejo da irrigação normalmente é realizado visando retomar a umidade do solo para o valor correspondente a capacidade de campo. Teoricamente, quando um solo atinge capacidade de campo, a planta dispõe de 100% da disponibilidade total de água (DTA) no solo. Tal forma de entender o manejo de irrigação é realizada visando a obtenção máxima da produtividade da cultura (Chen et al., 2013).

Diante disso, na literatura são encontrados estudos relatando que a lâmina de irrigação aplicada pode ser inferior a lâmina real necessária para elevar o solo/substrato a condição de 100% da DTA, sem que comprometa o rendimento da cultura e aumentando a qualidade dos frutos (Nangare et al., 2016; Hooshmand et al., 2019), dependendo apenas da magnitude do déficit hídrico que a cultura foi submetida. O déficit hídrico (DH) baseia-se na aplicação de água em volume inferior àquele utilizado para elevar a umidade atual do solo/substrato a umidade na capacidade de campo. Em alguns casos, a depender da magnitude do DH, o rendimento da cultura é reduzido, porém, a produtividade da água tende a ser semelhante ou até mesmo superior (Liu et al., 2023; Yu et al., 2023; Hooshmand et al., 2019; Bogale et al., 2016).

Uma das técnicas de DH utilizada para aumentar a produtividade da água, é a irrigação de déficit regulado (RDI). A RDI refere-se a uma estratégia de irrigação utilizada para economizar água, aplicando uma lâmina de irrigação inferior a real necessária pela cultura, sem que proporcione efeitos negativos sobre o rendimento da cultura e qualidade dos frutos, e proporcione apenas redução do crescimento vegetativo excessivo da planta (Chalmers et al., 1981), tornando-se assim uma técnica interessante principalmente para regiões com restrição hídrica.

A técnica de RDI pode ser utilizada para aumentar a produtividade da água na cultura do tomateiro, quando a aplicação da RDI ocorrer em apenas uma ou duas fases fenológicas de crescimento da cultura (Nangare et al., 2016; Chen et al., 2013). Os trabalhos científicos em maioria realizados aplicando a técnica de RDI na cultura do tomateiro, baseou-se na aplicação de uma determinada percentagem da lâmina de água evapotranspirada pela cultura, sendo a lâmina determinada por manejo da irrigação via clima (Hooshmand et al., 2019; Nangare et al., 2016) e via solo (Bogale et al., 2016; Chen et al., 2013; Patané e Cosentino, 2010) com turno de rega fixos, não sendo considerado o limite crítico do conteúdo de água no solo/substrato para a cultura, podendo assim, proporcionar estresse hídrico temporários ao tomateiro conforme observado nos trabalhos de Chen et al. (2013) e Patané e Cosentino (2010) e comprometer o rendimento, inclusive por aplicação de lâminas que excedem a DTA, pois nem sempre o conteúdo de água no solo é monitorado.

Outra prática que pode ser adicionada visando o aumento da produtividade da água no tomateiro, é considerar o potencial matricial do limite superior do conteúdo de água no substrato abaixo da capacidade de campo, visto que existe uma relação

linear entre o fluxo de evaporação de água do solo/substrato e conteúdo de água no solo, diminuindo ou inexistindo a medida que o conteúdo de água no solo diminui (Lemon, 1956).

E se tratando do cultivo em vasos e utilizando substratos agrícolas no cultivo do tomateiro, o manejo da irrigação via sensoriamento da água no substrato (SAS) automatizado pode proporcionar efeitos significativos e positivos sobre o rendimento e produtividade da água do tomateiro, pois possibilitará a manutenção da faixa do conteúdo de água no substrato entre o limite crítico inferior e superior pré-estabelecidos (Zhang et al., 2022; Campos et., 2021). Essa automação faz-se necessária diante do baixo volume de substrato no interior do vaso de cultivo ocupado pelo sistema radicular do tomateiro e pela diversidade de substratos agrícolas disponíveis no mercado, tendo assim, particularidades das propriedades hidráulicas e, conseqüentemente, diferença no armazenamento de água.

O baixo volume do vaso de cultivo e o desenvolvimento radicular do tomateiro, podem proporcionar em curto período mudanças das propriedades hidráulicas do substrato determinadas previamente antes do plantio (Michel e Kerloch, 2017; Schindler et al., 2016; Zorzeto et al., 2014; Cannavo e Michel, 2013; De Boodt e Verdonck, 1972), sendo talvez necessário a compreensão de que as características de retenção e condutividade da água no substrato podem ser variáveis ao longo do desenvolvimento da cultura.

Para avaliar os efeitos das mudanças das propriedades hidráulicas do substrato ao longo do ciclo da cultura do tomateiro, pode ser empregada a modelagem agro hidrológica (modelo SWAP – Soil, Water, Atmosphere and Plant) (Kroes et al., 2017) e a modelagem inversa (Hydrus 1D) (Simunek et al., 2013), para a investigação de diferentes cenários, evitando-se a necessidade da implantação de vários experimentos em campo e a necessidade de cultivo de um grande número de plantas, tornando o estudo dispendioso e demorado. Dessa forma, o Hydrus 1D foi utilizado neste estudo para determinar as propriedades hidráulicas do substrato em diferentes fases de cultivo do tomateiro e o modelo SWAP para estimar a evapotranspiração do tomateiro e a variação do armazenamento de água no substrato.

Diante do exposto, realizou-se o presente trabalho com objetivo de verificar se a produtividade da água do tomateiro varia em função da aplicação de diferentes faixas de potencial matricial de água no substrato e de investigar se as alterações das

propriedades hidráulicas do substrato na zona radicular do tomateiro implicam em efeitos sobre o manejo da irrigação.

2- REVISÃO DE LITERATURA

2.1- Cultivo do tomateiro (*Solanum lycopersicum* L.)

A cultura do tomate (*Solanum lycopersicum* L.) é originária da América do Sul (Cunha et al., 2014). No Brasil, os principais estados produtores são Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Bahia e Santa Catarina, responsáveis por aproximadamente 26,1, 24,1, 15,2, 7,0 e 3,12%, respectivamente, da produção total de 3,81 milhões de toneladas (IBGE, 2022). Nos últimos anos tem se observado uma demanda e um incremento significativo do tomate tipo cereja (Costa et al., 2018). O cultivo do tomate cereja, assim como do tomate grape, pode ser realizado em cultivo convencional a céu aberto ou em ambiente protegido (casa de vegetação). O cultivo em casa de vegetação, ambiente que tem sido comumente utilizado para trabalhos científicos (Soldateli et al., 2020; Hooshmand et al., 2019) e adotado por produtores, possibilita em regiões de altas temperaturas (com excesso de radiação) a produção ao longo de todo o ano, pois a proteção com telas e filmes plástico atenua a radiação solar incidente sobre a copa da cultura (Costa et al., 2015).

O cultivo protegido do tomateiro pode ser realizado diretamente no solo (Wu et al., 2021; Gong et al., 2020) ou em vasos preenchidos com solo (Santiago et al. 2018) e substratos agrícolas (Soldateli et al., 2020; Hooshmand et al., 2019), necessitando de irrigação.

Para o cultivo irrigado do tomateiro, os sistemas de irrigação localizada por gotejamento e microaspersão geralmente são os mais utilizados e recomendados (Balbino et al., 2010). Com a crescente demanda de água em casas domésticas e no setor industrial, além das mudanças climáticas que vem contribuindo com irregularidades nas precipitações e que contribuirão no aumento da escassez de água (Bogale et al., 2016), faz-se necessário técnicas de manejo da irrigação que contribuam para melhor utilização dessas águas, tendo em consequência, o aumento da produtividade da água.

Dentre as técnicas disponíveis para o aumento da produtividade da água, existe a irrigação por déficit, que se baseia na aplicação de água inferior a necessidade real da planta e/ou insuficiente para elevar o potencial matricial do solo

a faixa ótima de desenvolvimento da cultura (Fererres e Soriano, 2006; Bogale et al., 2016).

Dentre as técnicas de irrigação por déficit, existem duas que têm sido amplamente utilizadas na cultura do tomateiro, por exemplo: a irrigação por déficit regulado (RDI) utilizada por (Nangare et al., 2016; Hooshmand et al., 2019); e a secagem parcial da zona radicular (PRD) utilizada por (Hooshmand et al., 2019; Bogale et al., 2016).

2.2- Produtividade da água

A produtividade da água ($Prod_{\text{água}}$) trata-se da relação entre o rendimento da cultura e a água consumida (Fernández et al., 2020; Zwart e Bastiaanssen, 2004), definição essa semelhante a utilizada para o cálculo da eficiência do uso da água (EUA) (Van Dam et al., 2006). No entanto, alguns autores consideram que a EUA deve ser definida como a relação entre a evapotranspiração da cultura e quantidade de água aplicada via irrigação ou devido a precipitação (Perry et al., 2009), visto que o termo eficiência pode ser considerado a razão entre a quantidade de água total utilizada e a quantidade total de água aplicada (Fernández et al., 2020).

No entanto, para a $Prod_{\text{água}}$ é considerado o potencial de produtividade da cultura que a água aplicada pode proporcionar (Fernández et al., 2020; Zwart e Bastiaanssen, 2004), podendo ser influenciada pela estratégia de manejo da irrigação adotado pelo usuário (Liu et al., 2007). Já a EUA pode ser utilizada, por exemplo, para avaliar o desempenho da irrigação (Van Dam et al., 2006).

Na literatura os trabalhos abordando a $Prod_{\text{água}}$, visam aumentar e manter a produtividade da cultura utilizando menos água durante o ciclo de cultivo (Liu et al., 2023; Yu et al., 2023; Humphreys et al., 2006). Isso deve-se ao fato de que é necessário produzir mais com o aumento da população mundial (Wichelns, 2014). Além disso, o aumento da $Prod_{\text{água}}$ visa suprir a escassez hídrica de algumas regiões e ajudar na manutenção da água suficiente para os ecossistemas naturais (Sharma et al., 2015).

A utilização e o estudo para o aumento da $Prod_{\text{água}}$ em locais de escassez hídrica e de manejo da irrigação inadequado que proporciona desperdícios de água fazem-se necessário, para tornar o cultivo agrícola mais eficiente ambientalmente e economicamente (Liu et al., 2023; Yu et al., 2023). Também é importante ressaltar que a diminuição da água aplicada via irrigação deve respeitar os limites críticos da

cultura, visto que a fisiologia geral e os processos bioquímicos da planta podem ser afetados a partir do grau de DH submetido (Chakma et al., 2021).

Para a cultura do tomateiro, algumas técnicas de cultivos têm sido implementadas para aumentar a Prod_{água}, podendo citar: irrigação por déficit hídrico – DH (Liu et al., 2021; Wu et al., 2021); irrigação por déficit hídrico regulado – RDI (Hooshmand et al., 2019; Bogale et al., 2016; Nangare et al., 2016; e Chen et al., 2013); irrigação por secagem parcial na zona radicular – PRD (Hooshmand et al., 2019); irrigação localizada por gotejamento subsuperficial (Liu et al., 2023) reduzindo a lâmina de água evaporada; aplicações de silício submetido a estresse hídrico para aumentar a tolerância do tomateiro ao DH (Chakma et al., 2021).

Para o tomate do tipo grape, a alta suscetibilidade ao DH (Chakma et al., 2021) justifica o estudo de estratégias de manejo de irrigação que vise a manutenção ou aumentar a produtividade da cultura aumentando a Prod_{água}.

2.3- Manejo da irrigação por déficit hídrico (DH) e regulado (RDI)

O manejo da irrigação pode ser realizado visando repor a lâmina integral de água no solo/substrato evapotranspirada pela cultura (Albuquerque, 2008) ou repor apenas uma parte da lâmina evapotranspirada, utilizando a irrigação por déficit hídrico (DH), conforme utilizado por Liu et al. (2021) e Wu et al. (2021) na cultura do tomateiro. A DH é a aplicação de água para a cultura inferior a necessidade hídrica, visando aumentar a eficiência do uso da água (EUA), produtividade da água e os teores de sólidos solúveis (Wu et al., 2021). Na literatura são encontrados estudos aplicando a DH para todo o ciclo da cultura conforme utilizado por Liu et al., 2021 e apenas em um ou dois estádios fenológicos da cultura (podendo ser denominado de irrigação por déficit hídrico regulado – RDI) (Chalmers et al., 1981).

Em uma investigação científica realizada por Liu et al. (2021), ao analisarem os efeitos da DH (utilizando 100, 75 e 50% da evapotranspiração da cultura – ET_c), observaram que a redução da lâmina de irrigação proporcionou estatisticamente reduções sobre o crescimento, rendimento e consumo de água do tomateiro; já a EUA utilizando a irrigação de 50% da ET_c, foi significativamente superior a condição de irrigação com 100% da ET_c. Resultados semelhantes foram encontrados por Patané e Cosentino (2010), ao avaliarem o efeito da irrigação com 50% da ET_c ao longo do ciclo da cultura do tomate, sendo obtido menor rendimento estatisticamente, quando comparado ao tratamento com reposição da lâmina de irrigação de 100% da ET_c.

Já a irrigação por déficit regulado (RDI) foi conceituada pela primeira vez por Chalmers et al. (1981), sendo uma estratégia de irrigação utilizada para economizar água, que baseia-se no fornecimento de uma lâmina de irrigação inferior a necessidade real da cultura e que não proporcione efeitos negativos sobre o rendimento da cultura e qualidade do fruto, e proporcione apenas a redução do crescimento vegetativo excessivo da planta. A técnica da RDI é uma estratégia eficiente na economia de água e de grande importância para as regiões com restrição hídrica, como por exemplo, as Regiões Semiáridas (Ju et al., 2019).

A técnica da RDI é uma importante alternativa para o manejo da irrigação do tomateiro em casa de vegetação, pois os produtores visam a obtenção da máxima produtividade, podendo assim ocasionar o desperdício de água, ou seja, baixa eficiência do uso da água e produtividade da água (Chen et al., 2013).

O método de RDI tem sido utilizado como uma estratégia para aumentar a eficiência do uso da água/produtividade da água e para melhorar a qualidade nutricional dos frutos, utilizada por: Hooshmand et al. (2019), Bogale et al. (2016), Nangare et al. (2016) e Chen et al. (2013) na cultura do tomateiro; Blanco et al. (2019) na cultura da cereja doce; e Ju et al. (2019) na cultura da videira.

A RDI pode ser aplicada em todo o ciclo da cultura do tomateiro, conforme utilizado por Hooshmand et al. (2019) e Bogale et al. (2016) e/ou pode ser aplicada em apenas um ou dois estágios fenológicos da cultura do tomateiro, conforme utilizado por Nangare et al. (2016) e Chen et al. (2013).

Hooshmand et al. (2019) ao avaliarem os efeitos dos métodos de irrigação por secagem parcial na zona radicular (PRD) e RDI na cultura do tomateiro cultivada em vasos preenchidos com substrato e em casa de vegetação, verificaram que o rendimento do tomateiro por planta e a eficiência do uso da água não sofreram efeito significativo da RDI a 85% da necessidade de água da planta, quando comparado com o tratamento controle (lâmina de irrigação aplicada correspondente a 100% da necessidade hídrica da planta, calculada a partir do manejo da irrigação via clima utilizando o tanque Classe A e parcelada em 12 irrigações de aproximadamente um minuto, devido à baixa capacidade de armazenamento de água do substrato).

Em outro trabalho ao avaliarem o efeito da RDI de 50 da irrigação plena (utilizando 100% da necessidade hídrica da cultura, calculada a partir do manejo da irrigação via solo realizado diariamente, elevando o conteúdo de água atual no solo até o limite superior de água no solo referente a capacidade de campo), para os

métodos de irrigação por PRD e RDI nas cultivares de tomateiro *Matina* e *Cochoro*, cultivadas em vasos preenchidos com solo e em casa de vegetação, observaram que os métodos de irrigação não diferiram estatisticamente para as variáveis de número de frutas por planta, rendimento por planta e para a eficiência do uso da água (Bogale et al., 2016), sendo ainda relatado pelos autores que o PRD e a RDI proporcionaram redução significativa sobre o rendimento da cultura, no entanto, aumentou a qualidade e o conteúdo nutricional dos frutos e a eficiência do uso da água.

No estudo realizado por Nangare et al. (2016), ao investigarem os efeitos do método da RDI de 60 e 80% da necessidade hídrica diária (evapotranspiração diária) (calculada a partir do manejo da irrigação via clima, utilizando dados de evapotranspiração de referência, coeficiente de cultivo e área molhada da irrigação por gotejamento) da cultura do tomateiro aplicada em uma fase fenológica, duas fases fenológicas e durante todo o ciclo de cultivo, concluíram que a RDI de 80% ao longo de todo o ciclo da cultura e a RDI de 60% aplicada apenas na fase fenológica de crescimento vegetativo (aumentou o rendimento em cerca de 4%) não afetaram significativamente o rendimento da cultura; já os valores máximos de eficiência do uso da água (EUA) foi obtido nos tratamentos com RDI de 80% ao longo de todo o ciclo da cultura e na RDI de 60% aplicada apenas na fase fenológica de crescimento vegetativo; e os valores mínimos de EUA foram obtidos nos tratamentos testemunha (com a aplicação de 100% da necessidade hídrica da cultura) e na RDI de 60% aplicada nas fases fenológicas de crescimento vegetativo e frutificação.

No trabalho realizado por Chen et al. (2013), ao avaliarem o efeito da aplicação de 1/3 e 2/3 da irrigação completa (necessidade hídrica calculada entre o limite superior do conteúdo de água no solo referente a 90% da capacidade de campo e limite inferior de 75% do conteúdo de água no solo referente a capacidade de campo) em diferentes fases de desenvolvimento da cultura do tomateiro em ambiente protegido, observaram que a aplicação de 1/3 e 2/3 da irrigação completa nas fases de plântulas não proporcionaram efeitos significativos sobre a produtividade do tomateiro; já para a fase de floração e desenvolvimento dos frutos, apenas a aplicação de 2/3 da irrigação completa não proporcionou redução significativa sobre o rendimento da cultura; para a fase de maturação dos frutos, ambos os déficit estudados proporcionaram reduções significativas sobre a produtividade.

Conforme citado nos parágrafos anteriores, observa-se que nos estudos da técnica de DH e RDI utilizou-se o manejo da irrigação via solo e via clima, sendo

aplicada uma determinada percentagem da evapotranspiração total e/ou para retornar o conteúdo de água no solo/substrato antes da irrigação ao limite superior, porém, sem considerar o limite crítico do conteúdo de água no solo/substrato para a cultura, podendo assim, proporcionar o estresse hídrico a cultura em determinado momento.

No trabalho realizado por Chen et al. (2013), notou-se que para as fases fenológicas em que foi aplicado 1/3 ou 2/3 da irrigação total (calculada para o tratamento testemunha e utilizando o manejo da irrigação via solo), o conteúdo de água no solo antes da irrigação foi inferior ao limite crítico estabelecido para o manejo da irrigação; além disso, observou-se que o conteúdo de água no solo no momento antes da realização da irrigação foi diminuindo ao longo do tempo, podendo assim, atingir limites de conteúdo de água no solo inferiores ao limite crítico para a cultura. Comportamento semelhante foi encontrado no trabalho realizado por Patanè e Cosentino (2010), ao avaliarem o efeito da DH de 50% da ETc em comparação com o tratamento testemunha utilizando 100% da ETc na cultura do tomateiro, sendo observado no trabalho que o conteúdo de água no solo ultrapassou o limite crítico para a cultura, proporcionando estresse hídrico a cultura. Isso pode ser explicado pelo fato de que a planta não consome apenas a lâmina de água aplicada, e sim, a quantidade de água que necessita e que é capaz de extrair do solo.

Sendo assim, a irrigação automatizada é uma técnica alternativa para a realização do manejo da irrigação via sensoriamento do conteúdo de água no solo/substrato, permitindo que o conteúdo de água no solo/substrato fique acima do limite crítico inferior pré-estabelecido pelo usuário, conforme realizado por Zhang et al. (2022) e Campos et. (2021) na cultura do tomateiro, evitando que a planta seja submetida a estresses hídricos temporários. Além disso, a técnica permitirá a redução do limite superior do conteúdo de água no solo/substrato (utilizado no cálculo da lâmina de irrigação), visto que existe uma correlação linear entre a velocidade da perda de água por evaporação e o conteúdo de água no solo, até o momento em que a linearidade é inexistente e a velocidade de evaporação muito lenta (Lemon, 1956), tornando-se uma estratégia de irrigação para aumentar a produtividade da água.

2.4 Sensoriamento de água no solo/substrato (SAS)

Dentre os métodos utilizados para a realização do manejo da irrigação de uma determinada cultura, têm-se o manejo da irrigação via solo, que é realizado a partir da determinação/conhecimento do conteúdo de água no solo/substrato ($\theta_{\text{solo/substrato}}$).

Para a realização do manejo da irrigação é importante conhecer os $\theta_{\text{solo/substrato}}$ referentes a capacidade de campo, ponto de murcha permanente (PMP) e crítico para a cultura, obtidos a partir da curva de retenção de água do solo/substrato. A quantificação do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ é realizada através de métodos que medem direta e indiretamente uma determinada grandeza física do solo/substrato (Frizzone et al., 2012).

O $\theta_{\text{solo/substrato}}$ referente a capacidade de campo é a condição que representa 100% de água disponível às plantas, utilizando potenciais matriciais de -3,0 a -6,0 kPa para solos de textura arenosa, -1,0 kPa para solos de textura média, -3,3 kPa para solos de textura argilosa (Sousa et al., 2004) e 0,98 kPa para substrato (De Boodt e Verdonck, 1971). Já o $\theta_{\text{solo/substrato}}$ para o PMP é a condição que representa 0% de disponibilidade hídrica para a cultura, que geralmente para a maioria das culturas agrícolas corresponde ao potencial matricial de -1500 kPa (Sousa et al., 2004). Em relação ao $\theta_{\text{solo/substrato}}$ crítico para a cultura é variável para cada espécie de planta, sendo encontrado na literatura para a cultura do tomateiro valores de potenciais matriciais críticos de -40 kPa (Zheng et al., 2013; Coolong et al., 2011; e Wang et al., 2007). A diferença do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ entre a capacidade de campo e PMP corresponde à disponibilidade total de água (DTA) e a diferença do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ entre a capacidade de campo e crítico a cultura corresponde a água facilmente disponível (AFD) para a cultura, sendo fundamentais para a realização do manejo da irrigação via sensoriamento de água no solo/substrato (SAS) (Sousa et al., 2004).

Ao calcular a relação entre a AFD e a DTA obtêm-se o fator de reposição de água no solo/substrato (fator “f” – fator de depleção de água no solo/substrato), que indica o quanto de água a planta pode extrair da DTA, sem que haja DH (Sousa et al., 2004).

Em relação aos métodos de determinação do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ tem o gravimétrico, considerado padrão, que requer a amostragem em campo e um tempo de resposta de aproximadamente 24 h (Souza et al., 2013). Alternativamente, a determinação do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ pode ser realizada por métodos indiretos, utilizando sensores baseados em resistividade elétrica e princípios eletromagnéticos. Os sensores à base de resistividade elétrica e princípios eletromagnéticos necessitam de calibrações, correlacionando a grandeza física medida pelo sensor e o $\theta_{\text{solo/substrato}}$ medido pelo método padrão gravimétrico (Datta e Taghvaeian, 2023).

Dentre os sensores que podem ser utilizados para a determinação indireta do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ têm-se os tensiômetros, sondas de nêutrons, Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), sonda enviroscan (Soares et al., 2010; Ledieu et al., 1986) e GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) (utilizado por Nascimento et al., 2022).

Na agricultura irrigada, os sensores utilizados para a realização do manejo da irrigação via solo, podem ser utilizados: i) para o monitoramento do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ em determinados horários definidos pelo usuário (conforme realizado convencionalmente), sendo o sistema de irrigação acionado manualmente, quando o $\theta_{\text{solo/substrato}}$ atinge o potencial crítico a cultura pré-determinado, conforme realizado por Zheng et al. (2013) na cultura do tomateiro; ii) para o manejo da irrigação automatizado, sendo a leitura do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ realizada em determinado intervalo de tempo e o sistema de irrigação acionado quando o $\theta_{\text{solo/substrato}}$ atinge o potencial matricial crítico a cultura, conforme realizado por Zhang et al. (2022).

Os sensores de capacitância e dielétricos, por exemplo, possibilitam a inserção de sistema de irrigação automatizado, podendo assim, estabelecer a partir da curva de retenção de água no solo/substrato os limites críticos inferiores (para iniciar a irrigação) e superiores (para finalizar a irrigação), conforme utilizado nos trabalhos de McCarthy et al. (2023), An et al. (2021), Domingues-Nino et al. (2020).

O manejo da irrigação automatizado permite a manutenção da faixa do $\theta_{\text{solo/substrato}}$ pré-estabelecida, potencializando o desenvolvimento, rendimento e produtividade da água da cultura. Dessa forma, visando a manutenção do rendimento e o aumento da produtividade da água da cultura, faz-se necessário a investigação dos efeitos da utilização fixa do limite crítico inferior de -40 kPa definido por alguns autores para a cultura do tomateiro (Zheng et al., 2013; Coolong et al., 2011; e Wang et al., 2007) e a utilização de menores potenciais matriciais adotados como limite superior para o manejo da irrigação, pois ainda existe a carência de estudos científicos para a cultura do tomate grape cultivada em vasos de cultivo preenchidos com substrato.

2.5- Propriedades físicas e hidráulicas de substratos agrícolas

Substrato agrícola pode ser definido como um material sólido poroso, utilizado individualmente ou em conjunto, desde que não seja solo, capaz de fornecer

sustentação ao sistema radicular das plantas, trocas gasosas com a atmosfera terrestre, armazenar água e podendo ou não fornecer íons nutrientes a planta (Soldateli et al., 2020; Vence, 2008), sendo em alguns casos adicionados materiais orgânicos (turfa de sphagnum, por exemplo, predominantemente presentes nos substratos hortícolas) e minerais especiais para melhorar suas propriedades físicas e hidráulicas (Schindler et al., 2016). Dessa forma, a escolha do tipo de material e a composição do substrato são aspectos relevantes a serem considerados, pois serão responsáveis pela aeração, disponibilidade de água e íons nutrientes para o sistema radicular da planta (Michel e Kerloch, 2017; Schindler et al., 2016; Cannavo e Michel, 2013; De Boodt e Verdonck, 1972).

O cultivo de plantas em vasos de cultivo para plantas ornamentais (Michel e Kerloch, 2017) e hortícolas (Al Naddaf et al., 2011), assim como, o cultivo em vasos de cultivo para a cultura do tomateiro (Hooshmand et al., 2019; Soldateli et al., 2020; Jerca et al., 2016), telhados verdes (Peng et al., 2020) e sacolas plásticas na cultura do pepino (Al Naddaf et al., 2011), ambos os casos com a utilização de substratos têm sido técnicas empregadas/ investigadas em trabalhos científicos, buscando avaliar o desenvolvimento e o rendimento das plantas. Além disso, têm sido investigado os efeitos dos diferentes tipos e composições de materiais/resíduos orgânicos que formam os substratos agrícolas sobre o desenvolvimento das culturas e na disponibilidade de água (Al Naddaf et al., 2011; Chemetova et al., 2019; Michel e Kerloch, 2017; Cannavo e Michel, 2013; De Boodt e Verdonck, 1972).

Dentre os efeitos estudados de qualidade do substrato com diferentes composições de resíduos orgânicos/inorgânicos, ressalta-se a fitotoxicidade (Chemetova et al., 2019), granulometria (Chemetova et al., 2019; Zorzeto et al., 2014; Cannavo e Michel, 2013), alterações nas propriedades hidráulicas na presença ou não do sistema radicular da cultura no vaso de cultivo (Michel e Kerloch, 2017; Cannavo e Michel, 2013; De Boodt e Verdonck, 1972), aeração (Schindler et al., 2016; Zorzeto et al., 2014; Cannavo e Michel, 2013), capacidade de retenção de água (Michel e Kerloch, 2017; Schindler et al., 2016; Zorzeto et al., 2014) e a disponibilidade de água (Cannavo e Michel, 2013).

Dessa forma, pode ressaltar que o conhecimento das propriedades física, química e hidráulicas são importantes durante o ciclo de cultivo de uma cultura. E se tratando do manejo da irrigação, que visa repor a lâmina de água evapotranspirada pela cultura na quantidade e no momento correto (Albuquerque, 2008), o

conhecimento das propriedades hidráulicas do substrato torna-se imprescindível, pois possibilitará a determinação do conteúdo de água no substrato referentes aos potenciais matriciais de água na capacidade de campo, ponto crítico a cultura e no ponto de murcha permanente, podendo assim, determinar a curva de retenção de água no substrato (De Boodt e Verdonck, 1972).

As propriedades físicas do substrato relevantes para o bom desenvolvimento das plantas, pode destacar a porosidade total, aeração (macroporosidade), microporosidade e granulometria (Chemetova et al., 2019; Michel e Kerloch, 2017; Zorzeto et al., 2014). Zorzeto et al. (2014) ao avaliarem a macroporosidade (porosidade de aeração), AFD (na faixa de potencial matricial de água no substrato entre -1 e -5 kPa) e a água tamponante (na faixa de potencial matricial de água no substrato entre -5 e -10 kPa) em diferentes tipos e composições de substratos agrícolas, observaram que: os substratos com maiores granulometria proporcionam menores densidades e aumentam a porosidade e a aeração, porém, prejudicam a retenção de água, necessitando assim de irrigações mais frequentes; além disso, para os substratos de alta retenção de água e baixa porosidade, deve-se tomar cautela, pois pode afetar os limites ótimos de aeração, movimentação de água e drenagem.

Já Cannavo e Michel (2013) avaliando os efeitos de partículas de substrato com diâmetros entre 0 – 10 mm e 20 – 40 mm sobre a Rosa “Knock Out” em regime de irrigação constante de -1 kPa, observaram que a menores partículas proporcionaram a diminuição da porosidade de aeração, podendo ocasionar anoxia nas plantas, sendo recomendado pelos autores de que o manejo da irrigação precisa ser ajustado ao longo do ciclo da planta.

Embora não exista valores padronizados por normativas, na literatura são encontrados e recomendados valores para porosidade total na faixa entre 50 e 85% (Pardossi et al., 2011; De Boodt e Verdonck, 1972) e porosidade de aeração (macroporosidade) entre 20 e 30% (De Boodt e Verdonck, 1972) e entre 10 e 20% (Bugbee e Frink, 1986). No trabalho de Schindler et al. (2016), ao avaliarem previamente sem cultivo de plantas as propriedades físicas e hidráulicas de 18 diferentes composições de substrato e com diferentes proporções de turfa, observaram que a porosidade de aeração diminuiu com o aumento da proporção de turfa, ficando uma parte abaixo do valor crítico de 10%.

Para as propriedades hidráulicas do substrato, têm-se a curva de retenção e a condutividade hidráulica saturada do substrato (Schindler et al., 2016). Os primeiros

relatos na literatura para a determinação de curva de retenção de água no substrato foram realizados por De Boodt e Verdonck (1972), para o cultivo de plantas ornamentais em vasos, porém, limitada a -10 kPa, pois os autores relataram que as plantas ornamentais são sensíveis a baixos potenciais matriciais de água. Outros autores também ficaram limitados a -10 kPa na determinação da curva de retenção de água no substrato, conforme realizado por Michel e Kerloch (2017), Zorzeto et al. (2014), Cannavo e Michel (2013), Al Naddaf et al. (2011) na cultura do pepino e Cannavo et al. (2011). Pardossi et al. (2011) elaborou uma curva de retenção de água no substrato até -20 kPa. No entanto, De Boodt e Verdonck (1972) relataram que a curva de retenção de água no substrato deve abranger uma faixa de potencial matricial entre a zona saturada e ponto de murcha permanente, conforme foi realizado em substrato por Schindler et al. (2016).

A determinação da curva de retenção é importante pois correlaciona o conteúdo de água em função do potencial matricial de água (Van Genuchten, 1980), permitindo a determinação da disponibilidade total de água (DTA) e a água facilmente disponível (AFD) (Schindler et al., 2016). E se tratando do cultivo em substrato em vasos, a evolução do sistema radicular deve ser considerada, pois ao longo do ciclo da cultura a curva de retenção e a condutividade hidráulica saturada (K_s) são alteradas, conforme encontrado nos trabalhos realizados por: Michel e Kerloch (2017), com vasos de cultivo sem plantas e cultivando Radrazz Rosa x híbrida em quatro meios de cultivo (substratos) e três estratégias de irrigação alterando o limite crítico, sendo observado que a presença do sistema radicular aumentou a retenção de água e que a K_s sofreu diferenças insignificantes; e Cannavo e Michel (2013) para o cultivo de Rosa "Knock Out" em regime de irrigação constante (-1 kPa) e utilizando duas diferentes granulometria de substratos, notaram que o crescimento das raízes aumentou a retenção de água do substrato.

Em um trabalho avaliando o crescimento e rendimento do tomateiro cultivado em ambiente protegido e em vasos preenchidos com diferentes tipos de substratos e submetidos a diferentes taxas de irrigação, observou-se que o tipo de substrato e a taxa de irrigação causaram efeitos significativos estatisticamente sobre as variáveis analisadas (Jerca et al., 2016). No entanto, os autores não determinaram a curva de retenção e nem avaliaram a variação temporal de água no substrato, para verificar o efeito sobre a frequência de irrigação necessária para cada um dos diferentes tipos

de substrato, para promover um manejo da irrigação adequado para o desenvolvimento da cultura.

Para a determinação da curva de retenção do substrato, pode ser utilizado caixa de areia utilizada por Al Naddaf et al. (2011), mesas de tensão (Zorzeto et al., 2014), o método da coluna suspensa e extrator de pressão (Peng et al., 2020), psicrômetros (Bateman et al., 2019) e o método da evaporação estendida em conjunto com o dispositivo comercial HYPROP (Hydraulic Property Analyzer) – obtendo uma curva de retenção de água no substrato próximo ao ponto de murcha permanente (Schindler et al., 2016). Outro método que pode ser empregado para a determinação da curva de retenção em substratos é a modelagem inversa que já é empregada em solos agrícolas, apresentando boas performance, conforme utilizado por Silva et al. (2020) e Sasidharan et al. (2019). A utilização da modelagem inversa visa suprir as limitações quanto ao mau contato entre a placa porosa e a amostra de solo, por exemplo, tendo dificuldade no tempo/ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e água retida na amostra (Costa et al., 2008), além da obtenção de valores de conteúdo de água mais elevados nos potenciais matriciais de água próximo ao ponto de murcha permanente (Silva et al., 2020).

Diante do exposto, nota-se que já existe vários estudos relacionados a determinação das propriedades físicas e hidráulicas de diferentes materiais residuais orgânicos e inorgânicos de substrato e com diferentes proporções de composições, assim como, o efeito sobre o desenvolvimento de algumas espécies ornamentais e hortícolas. No entanto, ainda existe uma escassez de estudos relacionados ao desenvolvimento e rendimento da cultura do tomateiro e aos efeitos da evolução do sistema radicular sobre as propriedades físicas e hidráulicas do substrato em potenciais matriciais de água no substrato inferiores a -10 kPa no cultivo em vasos. Além disso, uma análise relacionada as implicações na variação temporal do conteúdo de água no substrato e no manejo da irrigação automatizada.

2.6- Modelagem em sistemas agrícolas irrigados

Os modelos capazes de prever o crescimento de uma cultura simulam o continuum solo-planta-atmosfera (Hu et al., 2019). Esses modelos de crescimento de plantas, possibilitam a redução da realização de inúmeros experimentos em campo, necessários para investigar diversas condições de conteúdo de água no solo/substrato, concentração de sais, tipo de manejo do solo/substratos, entre outros

fatores que tornam os experimentos realizados em campo, dispendiosos e demorados (Chen et al., 2019). Para a utilização desses modelos, faz-se necessário a calibração e validação, que quando bem sucedida, possibilita a investigação de diferentes cenários em diferentes condições hidrológicas e ambientais (Chen et al., 2019), podendo assim investigar estratégias de manejo que otimizem o rendimento da cultura e do uso da água (Chen et al., 2019; Hu et al., 2019).

Dentre os modelos de simulação, existem os agro hidrológicos que simulam apenas a dinâmica da água e de solutos em solos saturados e insaturados, como por exemplo, o modelo SWAP (Kroes et al., 2017) e o modelo Hydrus 1-D (Simunek et al., 2013); existem os modelos de sistemas agrícolas, que são capazes de simular o crescimento da cultura, como por exemplo, o modelo WOFOST (World Food Studies; Boogaard et al., 2014), EPIC (Climate Policy – Integrated Climate; Williams et al., 1989) e DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer; Jones et al., 2003); e os modelos agro eco hidrológicos que são capazes de simular a dinâmica da água e de solutos no solo e o crescimento das culturas, como por exemplo, o modelo LAWSTAC (Chen et al., 2019).

O modelo Hydrus 1-D simula de forma unidimensional o fluxo de água, calor e solutos com a presença ou não de sistema radicular, em meios porosos, variavelmente saturados, em regime estável ou transitório e em diferentes escalas temporais (Simunek et al., 2013). Para o fluxo de água é utilizada a equação de Richards, sendo a curva de retenção e a condutividade hidráulica a partir da equação de Van Genuchten (1980) (Simunek et al., 2013). O modelo pode ser utilizado para a obtenção dos parâmetros hidráulicos da equação de Van Genuchten a partir do método de evaporação e, conseqüentemente, obter a curva de retenção de água para o meio poroso, conforme realizado por Silva et al. (2020) e Kanzari et al. (2018).

Já a versão original do modelo WOFOST foi desenvolvida na linguagem Fortran, tendo sido utilizada algumas partes pelo modelo “WOFOST CONTROL CENTRE” (Boogaard et al., 2014) e pelo modelo SWAP (Kroes et al., 2017). O modelo WOFOST simula em detalhes os processos fotossintéticos, simulação dinâmica do desenvolvimento fenológico da emergência até a maturação, desenvolvimento foliar, transpiração, interceptação de luz, assimilação de dióxido de carbono, partição de assimilados para os órgãos de crescimento da parte aérea (folhas, caule, frutos) e radicular (raízes da planta), respiração, transpiração e acúmulo de matéria seca, levando em consideração os fatores definidores de crescimento (radiação solar,

concentração de dióxido de carbono, temperatura e características fisiológicas e fenológicas da cultura), fatores limitantes de crescimento (água e nutrientes) e os fatores redutores de crescimento (fatores bióticos e abióticos) (Eitzinger et al., 2004; Kroes et al., 2017; Wit et al., 2019). No entanto, em relação ao balanço hídrico no solo faz-se necessário a implementação de um modelo externo, visto que o WOFOST considera a camada de perfil do solo homogênea e distribuição de água na zona radicular constante durante o dia (Eitzinger et al., 2004). Relacionado a camada de solo, o WOFOST realiza apenas a simulação de processos relacionado ao crescimento radicular (Wit et al., 2019).

Dessa forma, utilizando os modelos agro hidrológicos e os de crescimento de cultura em conjunto, torna-se possível a simulação de diferentes cenários, utilizando diversas condições de contorno (como por exemplo, variando a disponibilidade de água no solo ou os parâmetros hidráulicos do solo) com a utilização de plantas, compreendendo melhor o processo agro-eco-hidrológico (Kroes et al., 2017). O modelo SWAP (modelo agro-hidrológico), por exemplo, possui um módulo com a implementação do modelo WOFOST (modelo de sistemas agrícolas), sendo assim capaz de simular com base física em zonas saturadas e insaturadas o transporte de água, soluto e calor na presença ou não de crescimento de plantas no solo (Kroes et al., 2017; Droogers et al., 2010).

O modelo SWAP, com a implementação do modelo WOFOST, possui módulos genéricos adaptados de crescimento simples e detalhado da cultura. Esses módulos genéricos podem ser incorporado ao SWAP a partir de um arquivo (formato .CRP) de cultura separado. O módulo de crescimento simples da cultura não calcula e/ou estima a produtividade potencial da cultura, no entanto, permite a simulação diária dos componentes do balanço hídrico do solo (tais como, variação de armazenamento de água no solo, evaporação, transpiração, evapotranspiração) e calcular a produtividade relativa, utilizando diferentes condições de parâmetros hidráulicos do solo e de potenciais matriciais iniciais de água no solo. Além disso, permite as simulações do fluxo de água, transporte de solutos, fluxo de calor e fluxos de drenagem lateral no solo (Kroes et al., 2017).

Para o cálculo do fluxo de água e/ou movimento de água em solos saturados e insaturados, o modelo SWAP utiliza a equação de Richards (equação 1).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(\Psi) \quad (1)$$

Em que,

θ = conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

t = tempo (h);

Ψ = potencial mátrico (cm H₂O);

z = coordenada vertical (cm);

$K(\theta)$ = representa a função condutividade hidráulica do solo em função do conteúdo de água (cm h^{-1});

$S(\Psi)$ = taxa de extração de água pelo sistema radicular ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{h}^{-1}$).

As relações entre θ , h e K são descritas a partir das equações 2 e 3 de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976).

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{n/(n-1)} \right) \right]^2 \quad (2)$$

$$S_e = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[\frac{1}{1 + |\alpha \cdot h|^n} \right]^{(n-1)/n} \quad (3)$$

Em que,

θ_r = conteúdo de água residual no substrato ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_s = conteúdo de água saturado no substrato ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

α (cm^{-1}), n e λ = parâmetros empíricos de ajuste da equação de Van Genuchten e Mualem.

Para quantificar a extração de água no solo pelas raízes das plantas, o modelo SWAP permite a escolha de utilizar a equação de Feddes et al. (1978) (equação 4).

$$S(\Psi) = Fr(h) \cdot \frac{T_{pot}}{|Z_r|} \quad (4)$$

Em que,

Fr (-) = fator de redução em função do potencial de água disponível no solo e responsável pelo déficit hídrico e aeração do meio poroso;

T_{pot} = transpiração potencial da cultura (cm d^{-1});

Z_r = profundidade do sistema radicular (cm);

Para estimar a evapotranspiração da cultura e a variação do conteúdo de água no solo, por exemplo, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros hidráulicos e profundidade do solo, dados de crescimento da cultura, dados meteorológicos do local (radiação solar incidente, temperatura, pressão atual de vapor, velocidade do vento e precipitação) e faixas de potenciais de água no solo recomendado para o crescimento potencial da cultura (Kroes et al., 2017).

O modelo SWAP juntamente com o módulo de crescimento WOFOST tem sido utilizado por: Hu et al. (2019) para estimar o crescimento e o rendimento da cultura da cana de açúcar; Kumar et al. (2015) para estimar o rendimento e a dinâmica de sais na zona radicular da cultura do trigo submetido a diferentes lâminas de irrigação com água salobra.

Para a cultura do tomateiro, o uso de modelos de crescimento de plantas tem sido pouco empregado, tendo sido utilizado apenas o modelo EPIC no trabalho de Yang et al. (2019), que avaliaram a performance do modelo na estimativa do rendimento da cultura do tomateiro cultivado em vasos e submetido a estresse hídrico e salino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Al Naddaf, O., Livieratos, I., Stamatakis, A., Tsirogiannis, I., Gizas, G., Savvas, D. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags. **Scientia horticulturae**, v. 129, n. 1, p. 135-141, 2011.

Albuquerque, P. E. P. Estratégias de manejo de irrigação. In: Albuquerque, P. E. P., Durães, F. O. M. Uso e manejo de irrigação. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 449-486.

An, S. K., Lee, H. B., Kim, J., Kim, K. S. Soil moisture sensor-based automated irrigation of Cymbidium under various substrate conditions. **Scientia Horticulturae**, v. 286, p. 110133, 2021.

Balbino, J. M. S., Abaurre, M. E. O., Castro, L. L. F. Manejo da água para a cultura. In: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper). Tomate. Vitória, ES: Incaper, 2010. p. 149-168.

Bateman, A. M., Erickson, T. E., Merritt, D. J., Veneklaas, E. J., Muñoz-Rojas, M. Water availability drives the effectiveness of inorganic amendments to increase plant growth and substrate quality. **Catena**, v. 182, p. 104116, 2019.

Blanco, V., Martínez-Hernández, G. B., Artés-Hernández, F., Blaya-Ros, P. J., Torres-Sánchez, R., Domingo, R. Water relations and quality changes throughout fruit development and shelf life of sweet cherry grown under regulated deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 217, p. 243-254, 2019.

Bogale, A., Nagle, M., Latif, S., Aguila, M., Müller, J. Regulated deficit irrigation and partial root-zone drying irrigation impact bioactive compounds and antioxidant activity in two select tomato cultivars. **Scientia Horticulturae**, v. 213, p. 115-124, 2016.

Boogaard, H.L., Wit, A.J.W.d., Roller, J., te Diepen, C.A.V., 2014. User's guide for the WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1.7 crop growth simulation model. Alterra. Wageningen University & Research Centre, Wageningen, pp. 133.

Bugbee, G. J.; Frink, C. R. Aeration of potting media and plant growth. **Soil science**, v. 141, n. 6, p. 438-441, 1986.

Campos, H. M., de Oliveira, H. F. E., Mesquita, M., de Castro, L. E. V., Ferrarezi, R. S. Low-cost open-source platform for irrigation automation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 190, p. 106481, 2021.

Cannavo, P., Michel, J.C. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. **Scientia horticulturae**, v. 151, p. 11-21, 2013.

Cannavo, P., Hafdhi, H., Michel, J. C. Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. **HortScience**, v. 46, n. 10, p. 1394-1399, 2011.

Chakma, R., Saekong, P., Biswas, A., Ullah, H., Datta, A. Growth, fruit yield, quality, and water productivity of grape tomato as affected by seed priming and soil application of silicon under drought stress. **Agricultural Water Management**, v. 256, p. 107055, 2021.

Chalmers, D. J., Mitchell, P. D., Van Heek, L. Control of Peach Tree Growth and Productivity by Regulated Water Supply, Tree Density, and Summer Pruning¹. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 106, n. 3, p. 307-312, 1981.

Chen, S., Mao, X., Barry, D. A., Yang, J. Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 160-174, 2019.

Chen, J., Kang, S., Du, T., Qiu, R., Guo, P., Chen, R. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. **Agricultural water management**, v. 129, p. 152-162, 2013.

Costa, E. S. P., Dos Santos, C. A., Rocha, M. C., Do Carmo, M. G. F. Caracterização física, físico-química e morfoagronômica de acessos de tomate cereja sob cultivo orgânico. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 61, p. 1-8, 2018.

Costa, E., Do Espírito Santo, T. L., Da Silva, A. P., Da Silva, L. E., De Oliveira, L. C., Benett, C. G. S., Benett, K. S. S. Ambientes e substratos na formação de mudas e produção de frutos de cultivares de tomate cereja. **Horticultura Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 110-118, 2015.

Costa, W. A., Oliveira, C. A. D. S., Kato, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 515-523, 2008.

Coolong, T., Surendran, S., Warner, R. Evaluation of irrigation threshold and duration for tomato grown in a silt loam soil. **HortTechnology**, v. 21, n. 4, p. 466-473, 2011.

Cunha, J. P. B.; Machado, T. D. A.; Santos, F. L.; Coelho, L. M. Perdas na colheita de tomate industrial em função da regulagem da colhedora. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 4, p. 363-369, 2014.

Datta, S., Taghvaeian, S. Soil water sensors for irrigation scheduling in the United States: A systematic review of literature. **Agricultural Water Management**, v. 278, p. 108148, 2023.

De Boodt, M. A. V. O.; Verdonck, O. The physical properties of the substrates in horticulture. In: III Symposium on Peat in Horticulture 26. 1971. p. 37-44.

Domínguez-Niño, J. M., Oliver-Manera, J., Girona, J., Casadesús, J. Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. **Agricultural Water Management**, v. 228, p. 105880, 2020.

Droogers, Peter, Immerzeel, W. W., Lorite, I. J. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 9, p. 1351-1359, 2010.

Eitzinger, J., Trnka, M., Hösch, J., Žalud, Z., Dubrovský, M. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. **Ecological modelling**, v. 171, n. 3, p. 223-246, 2004.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. In: Simulation Monographs. PUDOC, Wageningen, pp. 189.

Fereres, E., Soriano, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of experimental botany**, v. 58, n. 2, p. 147-159, 2007.

Fernández, J. E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V., Cuevas, M. V. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. **Agricultural water management**, v. 237, p. 106074, 2020.

Frizzone, J. A., Freitas, P. S. L., Rezende, R., Faria, M. A. Microirrigação:gotejamento e microaspersão. 1 ed. Maringá: Editora Eduem, 2012. 356 p.

Gong, X., Qiu, R., Sun, J., Ge, J., LI, Y., Wang, S. Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 235, p. 106154, 2020.

Hooshmand, M., Albaji, M., Nasab, S. B., Zadeh Ansari, N. A. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran. **Scientia Horticulturae**, v. 254, p. 84-90, 2019.

Hu, S., Shi, L., Huang, K., Zha, Y., Hu, X., Ye, H., Yang, Q. Improvement of sugarcane crop simulation by SWAP-WOFOST model via data assimilation. **Field Crops Research**, v. 232, p. 49-61, 2019.

Humphreys, E., Lewin, L. G., Khan, S., Beecher, H. G., Lacy, J. M., Thompson, J. A., Dunn, B. W. Integration of approaches to increasing water use efficiency in rice-based systems in southeast Australia. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1, p. 19-33, 2006.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produção de tomate. 2022. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/tomate/br>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

Jerca, I. O., Cimpeanu, S. M., Dudu, G. Research on the influence of substrate type and the amount and number of irrigations applied on the growth of tomatoes in the greenhouse. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 6, p. 467 471, 2016.

Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., Ritchie, J. T. The DSSAT cropping system model. **European journal of agronomy**, v. 18, n. 3-4, p. 235-265, 2003.

Ju, Y. L., Yang, B. H., He, S., Tu, T. Y., Min, Z., Fang, Y. L., Sun, X. Y. Anthocyanin accumulation and biosynthesis are modulated by regulated deficit irrigation in Cabernet Sauvignon (*Vitis Vinifera* L.) grapes and wines. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 135, p. 469-479, 2019.

Kanzari, S., Nouna, B. B., Mariem, S. B., Rezig, M. Hydrus-1D model calibration and validation in various field conditions for simulating water flow and salts transport in a semi-arid region of Tunisia. **Sustainable Environment Research**, v. 28, n. 6, p. 350-356, 2018.

Kroes, J.G., van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., van Walsum, P.E.V., 2017. SWAP Version 4: Theory Description and User Manual. Wageningen Environmental Research, Wageningen.

Kumar, P., Sarangi, A., Singh, D. K., Parihar, S. S., Sahoo, R. N. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 72-83, 2015.

Ledieu, J., De Ridder, P., De Clerck, P., Dautrebande, S. A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v. 88, n. 3-4, p. 319-328, 1986.

Lemon, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 1, p. 120-125, 1956.

Liu, X., Zhang, L., Liu, Q., Yang, F., Han, M., Yao, S. Subsurface irrigation with ceramic emitters: Optimal working water head improves yield, fruit quality and water productivity of greenhouse tomato. **Scientia Horticulturae**, v. 310, p. 111712, 2023.

Liu, J., Hu, T., Feng, P., Yao, D., Gao, F., Hong, X. Effect of potassium fertilization during fruit development on tomato quality, potassium uptake, water and potassium use efficiency under deficit irrigation regime. **Agricultural Water Management**, v. 250, p. 106831, 2021.

Liu, J., Williams, J. R., Zehnder, A. J., Yang, H. GEPIC—modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. **Agricultural systems**, v. 94, n. 2, p. 478-493, 2007.

McCarthy, A., Foley, J., Raedts, P., Hills, J. Field evaluation of automated site-specific irrigation for cotton and perennial ryegrass using soil-water sensors and Model Predictive Control. **Agricultural Water Management**, v. 277, p. 108098, 2023.

Michel, J. C., Kerloch, E. Evolution of hydraulic properties and wettability of organic growing media during cultivation according to irrigation strategies. **Scientia Horticulturae**, v. 217, p. 28-35, 2017.

Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

Nangare, D. D., Singh, Y., Kumar, P. S., Minhas, P. S. Growth, fruit yield and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as affected by deficit irrigation regulated on phenological basis. **Agricultural Water Management**, v. 171, p. 73-79, 2016.

Nascimento, F. A. L., da Silva, A. J. P., Freitas, F. T. O., Fernandes, R. D. M., Junior, L. A. V. Sensors and frequencies of soil water content measurement affecting agro-hydrological simulations and irrigation management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 194, p. 106763, 2022.

Pardossi, A., Carmassi, G., Diara, C., Incrocci, L., Maggini, R., Massa, D. 2011. Fertigation and Substrate Management in Closed Soilless Culture. EUPHOROS Report (UNIFI).

Patanè, C., Cosentino, S. L. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. **Agricultural water management**, v. 97, n. 1, p. 131-138, 2010.

Peng, Z., Smith, C., Stovin, V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125273, 2020.

Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., Burt, C. M. Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., Burt, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural water management**, v. 96, n. 11, p. 1517-1524, 2009.

Sasidharan, S., Bradford, S. A., Šimůnek, J., Kraemer, S. R. Drywell infiltration and hydraulic properties in heterogeneous soil profiles. **Journal of hydrology**, v. 570, p. 598-611, 2019.

Schindler, U., Müller, L., Eulenstein, F. Hydraulic performance of horticultural substrates—1. Method for measuring the hydraulic quality indicators. **Horticulturae**, v. 3, n. 1, p. 5, 2016.

Sharma, B., Molden, D., Cook, S. Water use efficiency in agriculture: Measurement, current situation and trends. In *Managing Water and Fertilizer for Sustainable Agricultural Intensification*. International Water Management Institute (IWMI): Colombo, Sri Lanka, 2015; pp. 39–64.

Silva, A. J. P., Pinheiro, E. A. R., Van Lier, Q. J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. **Irrigation Science**, v. 38, n. 3, p. 223-234, 2020.

Simonne, E., Hochmuth, R., Hochmuth, G., Studstill, D. W. Development of a nitrogen fertigation program for grape tomato. **Journal of Plant Nutrition**, v. 31, n. 12, p. 2145-2154, 2008.

Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., Van Genuchten, M. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water and Solutes in Three-Dimensional Variable Saturation and Heterogeneous Media. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA, p. 343, 2013.

Soares, F. C., Peiter, M. X., Robaina, A. D., Parizi, A. R. C., Ramão, C. J., VIVAN, G. A. Resposta da produtividade de híbridos de milho cultivado em diferentes estratégias de irrigação. **Irriga, Botucatu**, v. 15, n. 1, p. 36-50, 2010.

Soldateli, F. J.; Batista, C. B.; Godoy, F.; Mello, A. C.; Dos Santos Soares, F.; Bergmann, M. D.; Ethur, L. Z. Crescimento e produtividade de cultivares de tomate cereja utilizando substratos de base ecológica. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n.1, p. 1-10, 2020.

Sousa, V. F., Oliveira, A. S., Coelho, E. F., Borges, A. L. Irrigação. In: LIMA, A. A.; CUNHA, M. A. P. Maracujá: Produção e qualidade na passicultura. Cruz das Almas, BA: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2004. p. 151-167.

Souza, C. F., Pires, R. C. M., de Miranda, D. B., Varallo, A. C. T. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.

Van Dam, J. C., Singh, R., Bessembinder, J. J. E., Leffelaar, P. A., Bastiaanssen, W. G. M., Jhorar, R. K., Droogers, P. Assessing options to increase water productivity in irrigated river basins using remote sensing and modelling tools. **Water resources development**, v. 22, n. 1, p. 115-133, 2006.

Van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

Vence, L. B. Disponibilidad de agua-aire en sustratos para plantas. **Ciencia del suelo**, v. 26, n. 2, p. 105-114, 2008.

Wang, D., Kang, Y., Wan, S. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. **Agricultural Water Management**, v. 87, n. 2, p. 180-186, 2007.

Wichelns, D. Do estimates of water productivity enhance understanding of farm-level water management?. **Water**, v. 6, n. 4, p. 778-795, 2014.

Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., Spanel, D. A. The EPIC crop growth model. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 497-0511, 1989.

Wit, A., Boogaard, H., Fumagalli, D., Janssen, S., Knapen, R., van Kraalingen, D., Supit, I., Wijngaart, R. V. D., van Diepen, K. 25 years of the WOFOST cropping systems model. **Agricultural systems**, v. 168, p. 154-167, 2019.

Wu, Y., Yan, S., Fan, J., Zhang, F., Xiang, Y., Zheng, J., Guo, J. Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation. **Scientia Horticulturae**, v. 275, p. 109710, 2021.

Yang, H.; Du, T.; Mao, X.; Ding, R.; Shukla, M. K. A comprehensive method of evaluating the impact of drought and salt stress on tomato growth and fruit quality based on EPIC growth model. **Agricultural water management**, v. 213, p. 116-127, 2019.

Yu, X., Zhang, J., Zhang, Y., Ma, L., Jiao, X., Zhao, M., Li, J. Identification of optimal irrigation and fertilizer rates to balance yield, water and fertilizer productivity, and fruit quality in greenhouse tomatoes using TOPSIS. **Scientia Horticulturae**, v. 311, p. 111829, 2023.

Zhang, H., He, L., Di Gioia, F., Choi, D., Elia, A., Heinemann, P. LoRaWAN based internet of things (IoT) system for precision irrigation in plasticulture fresh-market tomato. **Smart Agricultural Technology**, v. 2, p. 100053, 2022.

Zheng, J., Huang, G., Jia, D., Wang, J., Mota, M., Pereira, L. S., Huang, Q., Xu, X., Liu, H. Responses of drip irrigated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield, quality and

water productivity to various soil matric potential thresholds in an arid region of Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 181-193, 2013.

Zorzeto, T. Q., Dechen, S. C. F., Abreu, M. F. D., Fernandes Júnior, F. Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, v. 73, p. 300-311, 2014.

Zwart, S. J., Bastiaanssen, W. G. M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agricultural water management**, v. 69, n. 2, p. 115-133, 2004.

CAPÍTULO I

PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO DO TOMATE GRAPE EM DIFERENTES FAIXAS DE POTENCIAL MÁTRICO

PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO DO TOMATE GRAPE EM DIFERENTES FAIXAS DE POTENCIAL MÁTRICO

RESUMO: O conhecimento dos limites críticos do potencial hídrico no substrato (Ψ) permite realizar irrigações que não excedam a capacidade de armazenamento de água no substrato e não prejudiquem o rendimento das culturas diante do estresse hídrico das plantas. Esta é uma estratégia de gestão de irrigação particularmente útil para automação de sistemas de detecção de água no solo. Neste estudo, a curva de retenção de água do substrato foi determinada por modelagem inversa e originou duas faixas de Ψ utilizadas como referência para programação de irrigação: faixa 1, crítico superior (UP Ψ) = -6 kPa e crítico inferior (LC Ψ) = -40 kPa; e faixa 2, UP Ψ = -14 kPa e LC Ψ = -40 kPa. Esses limites foram aplicados no manejo de irrigação do tomateiro de forma fixa e alterando os limites críticos de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura. A produtividade da água de irrigação da cultura do tomate foi determinada em função das variações nos valores do Ψ crítico. O experimento foi realizado em casa de vegetação. As plantas de tomateiro foram cultivadas em vasos preenchidos com substrato, fertirrigados por sistema automatizado de irrigação por gotejamento. A evapotranspiração do tomate foi determinada utilizando um lisímetro de pesagem. O conteúdo de água no solo foi monitorado pelos sensores GS1 e TDR100. A produtividade do tomate grape não foi significativamente afetada pelas diferentes faixas de Ψ aplicadas. Por outro lado, a produtividade hídrica foi estatisticamente maior nas plantas submetidas à faixa 2 ao longo do ciclo da cultura e quando esta faixa foi aplicada em pelo menos uma das fases de desenvolvimento da cultura.

Palavras chaves: *Solanum lycopersicum* L.; irrigação por gotejamento; manejo da irrigação; potenciais de água no substrato.

IRRIGATION WATER PRODUCTIVITY IN GRAPE TOMATO UNDER DIFFERENT MATRIC POTENTIAL RANGES

ABSTRACT: The knowledge of critical limits of water potential in the substrate (Ψ) allows performing irrigations that do not exceed the capacity of water storage in the substrate and do not harm crop yield against water stress of plants. This is an irrigation management strategy particularly useful for automation of soil water sensing systems. In this study, substrate water retention curve was determined by inverse modeling and originated two ranges of Ψ used as a reference for irrigation scheduling: range 1, upper critical (UP Ψ) = -6 kPa and lower critical (LC Ψ) = -40 kPa; and range 2, UP Ψ = -14 kPa and LC Ψ = -40 kPa. These limits were applied in the irrigation scheduling of grape tomato in a fixed form and by changing the critical limits according to the crop development stage. The irrigation water productivity of tomato crop was determined as a function of variations in the values and form of application of Ψ critic. The experiment was carried out in a greenhouse. Tomato plants were cultivated in pots filled with substrate, fertigated by an automated drip irrigation system. Tomato evapotranspiration was determined using a weighing lysimeter. Soil water content was monitored by GS1 and TDR100 sensors. Grape tomato yield was not significantly affected by the different ranges of Ψ applied. On the other hand, water productivity was statistically higher in plants subjected to range 2 throughout the crop cycle and when this range was applied in at least one of the crop development stages.

Keywords: *Solanum lycopersicum* L.; drip irrigation; irrigation management; water potentials in the substrate.

Introdução

O cultivo em ambiente protegido, prática comum em experimentos científicos (Soldateli et al., 2020; Hooshmand et al., 2019) tem sido amplamente adotado por produtores. Dentre as vantagens do cultivo em ambiente protegido, destaca-se a redução do risco do investimento pela diminuição da incidência de pragas e doenças. O cultivo do tomateiro em ambiente protegido pode ser realizado diretamente no solo (Li et al., 2021; Wu et al., 2021; Gong et al., 2020), em vasos preenchidos com solo (Santiago et al. 2018) e/ou substratos agrícolas (Parada et al., 2021; Soldateli et al., 2020; Hooshmand et al., 2019).

Em geral os substratos são leves, facilitam a drenagem, apresentam baixa densidade, proporcionando bom desenvolvimento radicular. Tais características facilitam a redistribuição de água e exigem cuidados especiais no manejo da irrigação para que não ocorra lixiviação dos nutrientes devido ao excesso de água aplicado ou diminuição no desenvolvimento da cultura em função da insuficiência no volume aplicado. Dentre os métodos disponíveis para a realização do manejo da irrigação em ambiente protegido, podemos citar o manejo da irrigação via clima que utiliza modelos matemáticos para estimar a evapotranspiração da cultura, conforme utilizado por Li et al., 2021; Wu et al., 2021; Santiago et al., 2018; Hooshmand et al., 2019 e sensoriamento da água no solo (SAS) que utiliza sensores para monitorar o conteúdo de água na zona radicular, conforme utilizado nos estudos de An et al., 2021; Liu et al., 2021; Sharma e Irmak, 2021. Tais métodos podem ser utilizados individualmente ou em conjunto para a tomada de decisão do volume de água a ser aplicado e do momento de iniciar e finalizar uma irrigação.

O adequado manejo da irrigação via sensoriamento de água no solo (SAS) depende do conhecimento prévio dos limites críticos de potencial (Ψ) ou conteúdo de água no solo (θ). O limite crítico superior é a referência para o momento de desligar a moto-bomba, enquanto o limite crítico inferior é a referência para ligar a moto-bomba. Quando o manejo da irrigação é baseado em limites críticos de Ψ , a curva de retenção de água no solo ou substrato (SWRC) é necessária para conversão dos valores de Ψ em lâmina de irrigação.

Geralmente, uma única faixa de potencial matricial é recomendada para todo ciclo produtivo. No entanto, para o cultivo do tomate em substrato tais faixas podem ser diferentes e aplicadas de distintas formas durante as fases do ciclo da cultura o que pode maximizar a produtividade da água.

Os valores de Ψ referem-se à energia da água em função de sua capilaridade e adsorção aos sólidos que compõem o substrato, por isso é uma boa referência para o manejo da irrigação, pois é o principal responsável pelo movimento da água no sistema substrato-planta em condições não saturadas. A composição do substrato interfere na capacidade de retenção de água, tornando característica específica da composição do substrato a relação entre θ e Ψ . Pode-se obter a relação $\theta \times \Psi$ graficamente por meio da SWRC. A SWRC pode ser determinada por métodos de equilíbrio estático ou via modelagem inversa de condições transientes. Alguns equipamentos são utilizados na obtenção da SWRC via equilíbrio estático, por exemplo os psicômetros, conforme utilizado por Bateman et al. (2019), a tensiometria utilizado por Schindler et al. (2017), caixa de areia (utilizada por Al Naddaf et al., 2011), mesas de tensão conforme utilizado por Zorzeto et al. (2014), método da coluna suspensa (Peng et al., 2020) e Câmara de Richards (Peng et al., 2020).

Uma alternativa aos métodos de equilíbrio estático para determinação da SWRC é a modelagem inversa (IM). A IM consiste na utilização de um modelo numérico baseado na discretização da equação de Richards capaz de simular variações espaço-temporal de θ ou Ψ em condições transientes. Por meio da relação entre dados de θ ou Ψ medidos experimentalmente e modelados o conjunto de parâmetros da equação de Van Genuchten é gerado a partir de uma função objetiva que aproxima os valores simulados dos observados. Os parâmetros obtidos irão gerar a SWRC. Alguns autores (Silva et al., 2020; Sasidharan et al., 2019) utilizaram a modelagem inversa para obtenção da SWRC utilizando o Software Hydrus – 1D (Simunek et al., 2013).

A SWRC é imprescindível para o manejo da irrigação via SAS. Pois, o cálculo da lâmina de irrigação pode ser realizado para retornar θ a um valor correspondente ao potencial matricial relativo ao conceito de capacidade de campo, conforme foi realizado por Liu et al. (2021) na cultura do pepino e Zheng et al. (2013) na cultura do tomate, ou a para valores inferiores à capacidade de campo, desde que o θ referente ao potencial matricial crítico da cultura seja conhecido, como reportado por Sharma e Irmak (2021) na cultura do milho e Coolong et al. (2011) na cultura do tomateiro. Assim, a variação de uma faixa de Ψ no solo/substrato pode não alterar significativamente o rendimento da cultura, mas pode reduzir o volume de água aplicado durante todo o ciclo da cultura.

Diante disso, objetivou-se no presente trabalho avaliar a produtividade da água ($Prod_{\text{água}}$) de irrigação do tomate “Grape” cultivado em substrato e submetido ao manejo da irrigação via SAS considerando diferentes faixas de potencial matricial da água no substrato aplicadas em distintas fases do ciclo da cultura.

Metodologia

Caracterização experimental

A pesquisa experimental foi realizada em casa de vegetação, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – Campus Governador Mangabeira (12°36'30,53” de latitude Sul e 39°01'51,71” de longitude Oeste).

A casa de vegetação utilizada é do tipo “teto em arco” (com orientação no sentido leste/oeste), possuindo 27 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de pé-direito. A estrutura da casa de vegetação foi constituída por tela tipo antiafídeo nas laterais e por um filme plástico do tipo anti UV 150 nm na cobertura. No interior da casa de vegetação foram colocados 245 vasos de polietileno, com capacidade volumétrica individual de 8 L. Os vasos foram distribuídos em 7 linhas de cultivo, sendo as duas linhas mais próximas das laterais da casa de vegetação utilizadas como bordaduras (Figura 1). O espaçamento de plantio foi 1 m entre linhas e 0,5 m entre plantas. Os vasos de polietileno foram preenchidos com substrato comercial composto por calcário, turfa de sphagnum, fibra de coco e casca de arroz, possuindo uma densidade de matéria seca de 160 kg m^{-3} e pH de 6,5.



Figura 1: Área interna da casa de vegetação utilizada para o cultivo do tomateiro, aos 10 dias após o transplântio.

Cada vaso com planta representou uma parcela experimental. A irrigação foi por gotejamento, com manejo via SAS, mantendo-se fixo o limite crítico inferior (momento de ligar a moto-bomba) em -40 kPa e variando-se o limite crítico superior (momento de desligar a moto-bomba): -6 kPa e -14 kPa. Adicionalmente, avaliou-se o efeito da utilização do valor de -14 kPa em apenas uma fase de desenvolvimento da cultura (I; II; ou III) e em duas fases de desenvolvimento da cultura (I e II; I e III; II e III). Portanto, o experimento foi constituído de 8 tratamentos, conforme Tabela 1. Os tratamentos submetidos a uma das duas faixas de potencial (-6 a -40 kPa ou -14 a -40 kPa) durante todo o ciclo da cultura e os submetidos a combinações destas faixas conforme o ciclo da cultura, tiveram 21 e 6 repetições, respectivamente, totalizando assim em 78 parcelas experimentais.

Tabela 1. Variações na aplicação das faixas de potencial matricial da água no substrato por fases fenológicas do tomate ‘grape’.

Faixa de potencial matricial Ym (kPa)	Fase fenológica de aplicação
Ym 6 a 40 kPa	Ciclo completo
Ym 14 a 40 kPa	Ciclo completo
Ym 14 a 40 kPa	Fase I
Ym 14 a 40 kPa	Fase II
Ym 14 a 40 kPa	Fase III
Ym 14 a 40 kPa	Fases I e II
Ym 14 a 40 kPa	Fases I e III
Ym 14 a 40 kPa	Fases II e III

Cultivo e nutrição

A adubação nutricional foi realizada conforme as recomendações de Nick et al. (2018) e Martinez (2017). As mudas das plantas de tomate foram obtidas por propagação sexuada, a partir da sementeira em bandejas com células de 126 mL preenchidas com substrato. O transplante das mudas para as parcelas experimentais foi realizado 25 dias após a germinação, realizado conforme Abaurre (2010), que recomenda que as mudas sejam transplantadas quando apresentarem entre quatro e seis folhas definitivas (geralmente entre 20 e 30 dias após a germinação), sem estiolamento, bem desenvolvidas e em ótimas condições sanitárias.

Aos 10 dias após o transplante (DAT), as mudas de tomate foram conduzidas a partir do tutoramento vertical, e a medida em que as plantas foram crescendo, foi realizado o amarramento das plantas ao suporte de tutoramento utilizando fitilhos de plástico, seguindo as recomendações técnicas indicadas por Abaurre (2010).

Além disso, ao longo do ciclo da cultura foi realizado o monitoramento da condutividade elétrica do substrato (CE_{sub}). Para isso, instalou-se extratores de cápsulas porosas nos vasos de cultivo a 0,1 m de profundidade, com leituras realizadas a cada 3 dias. A condutividade elétrica da solução do substrato extraída variou entre 1,9 e 2,9 $dS\ m^{-1}$, durante todo o ciclo da cultura do tomateiro. A solução nutritiva utilizada para a fertirrigação das plantas variou entre 0,90 e 1,80 $dS\ m^{-1}$, com a finalidade de manter a faixa de condutividade elétrica da solução do substrato entre 1,8 (condutividade elétrica da solução nutritiva utilizando água de 0,25 $dS\ m^{-1}$ e os

íons nutrientes da solução nutritiva adotada/recomendada para o cultivo do tomateiro) e $4,9 \text{ ds m}^{-1}$. A condutividade elétrica máxima da solução do substrato de $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ foi adotada a partir do trabalho realizado por Andriolo et al. (2003), que verificaram efeito não significativo na produtividade do tomateiro quando cultivado abaixo dessa condutividade elétrica em substrato.

Manejo da irrigação e monitoramento da umidade do substrato

O manejo da irrigação foi realizado de forma automatizada, utilizando uma placa Arduino, sensores GS1, válvulas solenóides e um conjunto motobomba.

A tomada de decisão para iniciar e finalizar uma irrigação, foi com base nos limites inferiores e superiores de umidade do substrato (Tabela 1). Utilizou-se dois valores de potenciais matriciais como limite superior: -6 kPa ($0,52 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e -14 kPa ($0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Já o limite inferior foi de -40 kPa ($0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) fixado em ambas as condições de reposição da lâmina de irrigação adotados, valor este derivado dos trabalhos de Zheng et al. (2013), Coolong et al. (2011) e Wang et al. (2007). Dessa forma, tornou-se possível determinar o tempo de irrigação necessário para elevar a umidade do substrato do limite inferior até a umidade do substrato no limite superior, conforme a equação 1, abaixo.

$$T_{\text{irrigação}} = \frac{(\theta_{LS} - \theta_{LI}) \times \text{Volume}_{\text{vaso}} \times \frac{1}{Ef}}{Q_E} \quad (1)$$

Em que,

$T_{\text{irrigação}}$ = tempo de irrigação necessário para elevar a umidade do substrato do limite inferior até a umidade do substrato no limite superior (h);

θ_{LS} = umidade volumétrica do substrato para o limite superior ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

θ_{LI} = umidade volumétrica do substrato para o limite inferior ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$);

$\text{Volume}_{\text{vaso}}$ = volume do vaso de cultivo (L);

Ef = eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (decimal) igual a 90%;

Q_E = vazão do emissor (L h^{-1}).

A perda de água por percolação profunda após a finalização dos eventos de irrigação não foi identificada após os 10 dias após o transplântio (DAT).

Sensores de água no substrato (SAS) e lisímetros de pesagem

Realizou-se a calibração dos SAS, obtendo-se curvas e equações (Figuras 2A e 2B) que correlacionam valores de umidade volumétrica (θ) no substrato aos de sinal elétrico (mV V^{-1}) para uso dos sensores GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) e constante dielétrica (k_a) para uso da TDR (Campbell Scientific, INC., Logan, Utah, USA).

A TDR utilizada foi do modelo TDR-100, acoplada a um conjunto de multiplexadores e a um datalogger modelo "CR800 Campbell Scientific" para a obtenção e armazenamento dos valores de umidade volumétrica do substrato, em intervalos de tempo de 30 min.

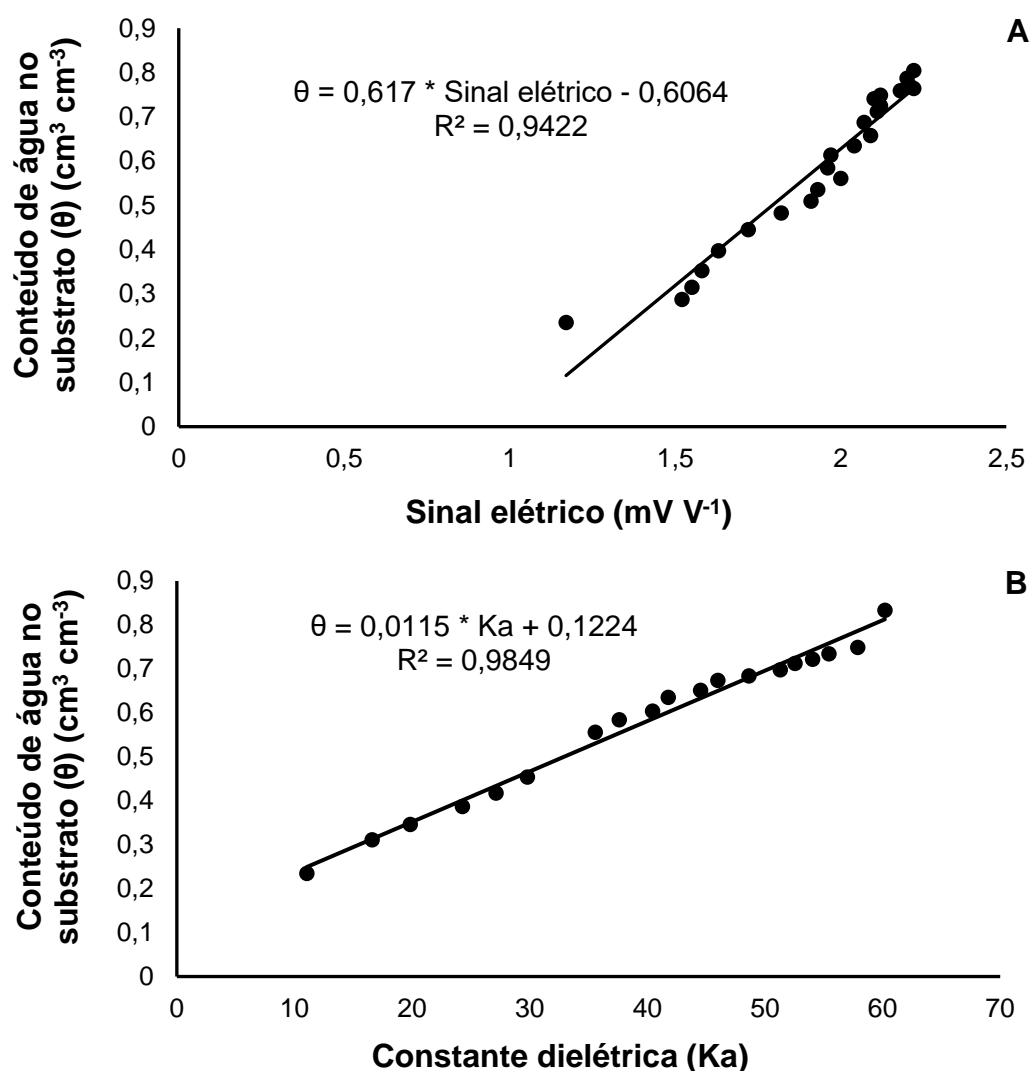


Figura 2: Curva de calibração e equação de ajuste para os sensores GS1 (A) e TDR (B).

Os sensores GS1 foram utilizados na automação do manejo da irrigação, sendo monitorados dois vasos de cultivo para controle do manejo de irrigação com a faixa de Ψ entre -6 e -40 kPa e mais dois vasos de cultivo para a faixa de -14 a -40 kPa. Já os sensores TDR foram utilizadas para monitoramento suplementar da variação de θ em dois lisímetros de pesagem (um lisímetro para a faixa de -6 a -40 kPa, outro para faixa de -14 a -40 kPa) e em dois vasos de cada condição de manejo da irrigação utilizada no experimento, totalizando-se em 18 vasos monitorados por TDR.

Os lisímetros de pesagem foram instalados no centro da casa de vegetação, sendo utilizado um lisímetro para determinação da evapotranspiração de uma planta cultivada sob a faixa de potencial entre -6 e -40 kPa, outro para planta cultivada sob a faixa de -14 e -40 kPa. Cada lisímetro era composto por um vaso de polietileno de 8 L preenchido com substrato e uma plataforma de pesagem com capacidade para 60 kg e resolução de pesagem de 0,006 kg.

Os lisímetros de pesagem foram utilizados para quantificar a evapotranspiração do cultivo entre duas irrigações. Para tanto, registrou-se de forma automática a variação horária de massa nas plataformas de pesagem. Dessa forma, tornou-se possível a determinação do volume de água consumido, tanto na condição de cultivo sob a faixa de potencial entre -6 e -40 kPa, quanto sob a faixa e de -14 a -40 kPa, conforme a equação 2, abaixo.

$$Volume_{\text{água}} = Massa_t - Massa_{t+1} \quad (2)$$

Em que,

Volume_{água} = volume de água consumido pelo cultivo em determinado tempo específico (L);

Massa_t = massa do lisímetro de pesagem imediatamente após fim de uma irrigação (kg);

Massa_{t+1} = massa do lisímetro de pesagem imediatamente antes de iniciar uma irrigação (kg).

As plataformas de pesagem foram calibradas através da aplicação e retirada de massas conhecidas, obtendo-se assim, equações de ajuste que correlaciona massa (kg) com sinal elétrico (mV V⁻¹): (Equações 3 e 4).

$$Massa = 46,707 \cdot Sinal\ elétrico - 14,002 \quad (R^2 = 0,9998) \quad (3)$$

$$Massa = 88,895 \cdot Sinal\ elétrico - 13,357 \quad (R^2 = 1,0000) \quad (4)$$

Em que,

Massa = massa do lisímetro de pesagem (kg);

Sinal elétrico = sinal elétrico emitido pela célula de carga (mV V⁻¹).

Obtenção das propriedades hidráulicas do substrato (PHS) por modelagem inversa

Determinou-se as PHS por meio de um experimento de modelagem inversa, utilizando o software HYDRUS – 1D, version 4.16.0110 (Simunek et al., 2013). Para isso, instalou-se dois sensores de umidade de substrato modelo GS1 (Decagon), nas profundidades de 0,05 e 0,12 m em cada um dos dois lisímetros de pesagem.

Os lisímetros de pesagens foram saturados com o dreno fechado. O substrato do lisímetro foi posto à secar, sendo que a saída de água ocorreu apenas devido ao processo de evaporação. As variações do conteúdo de água no substrato e a variação de massa que ocorreu na plataforma de pesagem (perda de água por evaporação), foram medidas e armazenadas em um datalogger modelo “CR800 Campbell Scientific” em intervalos de 15 minutos, durante um período de 52 dias.

Os dados obtidos da variação do conteúdo de água no substrato e de evaporação foram inseridos no software HYDRUS – 1D, para resolução da equação 5 de Richards (Richards, 1931) que estima o fluxo de água no substrato.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (5)$$

Em que,

h = potencial mátrico de água no substrato (m H₂O);

θ = conteúdo de água no substrato (m³.m⁻³);

t = tempo (h);

z = coordenada vertical (m);

K(θ) = representa a função condutividade hidráulica do substrato (m h⁻¹).

Para descrever a SWRC (equação 6) e a curva de condutividade de água no substrato (SWCC) (equação 7) utilizou-se o modelo de Mualem-van Genuchten (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980).

$$\begin{cases} \theta(h) = \theta_s & h \geq 0 \\ \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^{(1-\frac{1}{n})} & h < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 \quad (7)$$

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (8)$$

Em que,

θ_r = conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s = conteúdo de água saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

h = potencial mátrico (m);

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica não saturada do substrato (m h^{-1});

K_s = condutividade hidráulica saturada do substrato (m h^{-1});

S_e = saturação efetiva,

α , n e λ = parâmetros empíricos.

No software HYDRUS – 1D, a determinação dos parâmetros hidráulicos do substrato (θ_r , θ_s , α , n , λ e K_s) foi realizada pela minimização entre as variáveis θ observados e simulados no espaço e no tempo. Para isso, utilizou-se o total das diferenças obtidas entre os valores de θ observados e simulados, podendo ser expressa a partir de uma função objetivo (Φ) em função de θ (equação 9).

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{nj} [\theta_{TDR,j}(z_i, t_i) - \theta_{EST,j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (9)$$

Em que,

Φ = função objetivo em função de θ ;

θ_{TDR} = conteúdo de água no substrato;

θ_{EST} = conteúdo de água no solo estimado utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados em β (Θ_r , Θ_s , α , n , λ e K_s);

t_i = horário (tempo) da leitura;

z_i = posicionamento do sensor de umidade;

j = número de leituras realizadas no mesmo ponto;

m = número de diferentes locais de medidas de umidade;

n = número de medidas realizadas.

Nota-se na equação 8, que o lado direito da equação refere-se ao resíduo entre os somatórios dos valores do conteúdo de água observados no sensor GS1 no tempo t_i para j medidas em z_i e os correspondentes valores de conteúdo de água estimados utilizando os parâmetros do substrato otimizados em β . Para minimizar a função objetiva (Φ) foi utilizado o método não linear de Levenberg-Marquardt.

De posse das propriedades hidráulicas do substrato, determinou-se os pares de valores ($\theta \times \Psi$) que representaram os limites críticos para o manejo da irrigação (Figura 3).

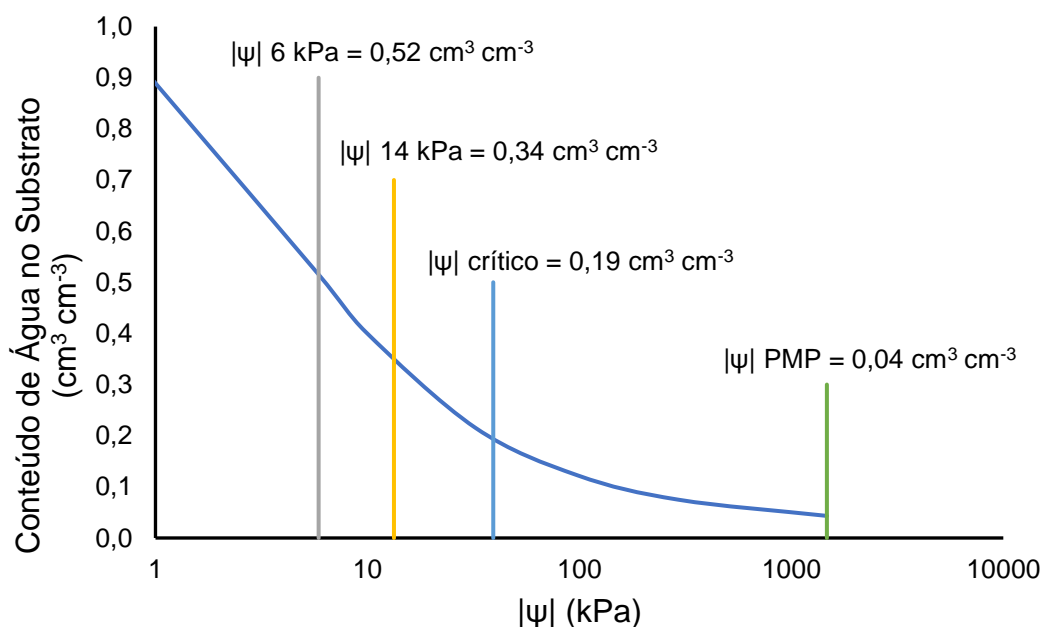


Figura 3. Curva de retenção de água no substrato.

Monitoramento meteorológico

No interior da casa de vegetação foi montada uma estação meteorológica, composta por piranômetro, termômetro e higrômetro, para medir, respectivamente, a

radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar (Figura 4A e 4B). A temperatura média no período foi de 23,8 °C. As temperaturas mínimas e máximas diárias no período, variou entre 15,99 – 22,89 °C e 25,83 – 41,50 °C, respectivamente. Já a umidade do ar média no período foi de 79,19%, tendo as mínimas e máximas diárias variando entre 32,63 – 74,76% e 90,40 – 96,20%.

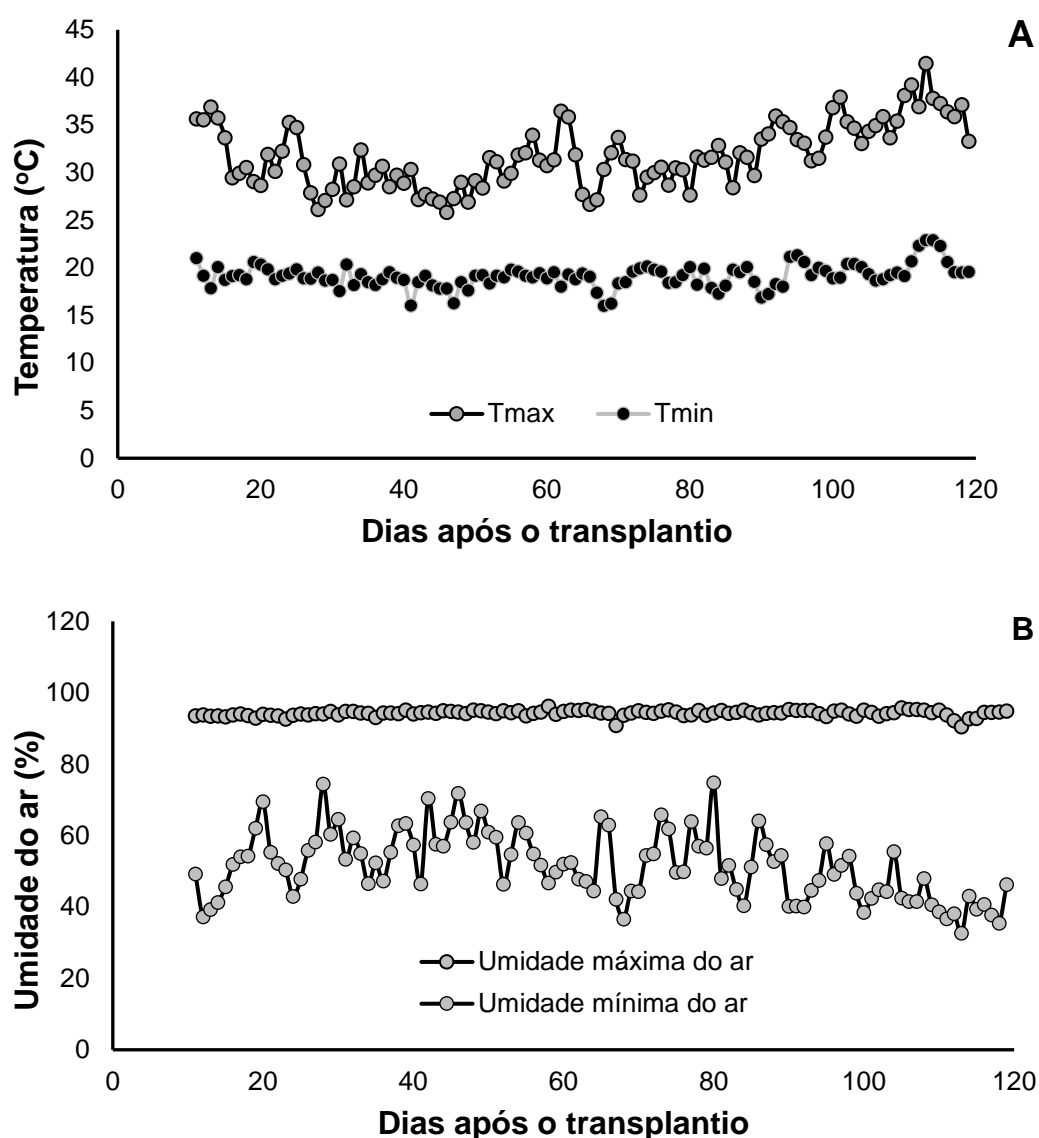


Figura 4: Temperatura máxima (T máx) e mínima (T mín) do ar (A) e umidade máxima e mínima do ar (B), dias após o transplântio, no interior da casa de vegetação.

Análises de crescimento e produtividade do tomateiro

Para as condições de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar a umidade do substrato ao potencial de -6 e -14 kPa, foram realizadas análises

destrutivas de três plantas (para cada condição de manejo da irrigação), em intervalos de 25 dias, determinando as seguintes variáveis: diâmetro do caule (DC), altura da planta (altura), massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do caule (MFC), número de folhas (NF), massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC), massa dos frutos e área foliar (AF).

Para a determinação do DC e altura da planta, utilizou-se um paquímetro digital e uma fita métrica milimetrada, respectivamente. E para a determinação das variáveis MFF, MFC, NF, MSF e MSC utilizou-se balança de precisão ($\pm 0,01$ g).

Já para a determinação da área foliar (AF) do tomateiro, obteve-se inicialmente equações de ajuste através da correlação entre os valores reais da área foliar (obtido pelo escaneamento das folhas e utilização do software “ImageJ”) x comprimento (C) e/ou largura (L) da folha. Para a obtenção das equações de ajuste foi adotado a correlação entre valores reais x (C x L), pois apresentaram melhor correlação (levando em consideração o valor de R^2). As equações de ajuste foram obtidas utilizando duas plantas (para cada coleta ou análise destrutiva), para as coletas realizadas aos 25 (Equação 10) e 49 dias após o transplante (DAT) (Equação 11). Essas equações de ajustes foram utilizadas para estimar a área foliar das demais plantas coletadas para análise destrutiva.

$$AF = 0,2117 . C . L + 18,440 \quad (R^2 = 0,9135) \quad (10)$$

$$AF = 0,3120 . C . L - 21,677 \quad (R^2 = 0,9306) \quad (11)$$

Em que,

AF = área foliar de uma única folha (cm^2);

C = comprimento da folha (cm);

L = largura máxima da folha (cm).

A colheita dos frutos maduros do tomateiro foi realizada semanalmente em todas as plantas e em ambas as condições de manejo da irrigação investigada, no período entre 56 e 111 DAT. Em laboratório, determinou-se o diâmetro, comprimento, número e massa dos frutos.

Produtividade da água de irrigação

A produtividade da água de irrigação ($Prod_{\text{água}}$) nas diferentes condições de manejo da irrigação, foi quantificada com base na relação entre produção e consumo de água da cultura após o transplântio, conforme a equação 12, abaixo.

$$Prod_{\text{água}} = \frac{MFFr}{Volume\ total_{\text{água}}} \quad (12)$$

Em que,

$Prod_{\text{água}}$ = produtividade da água de irrigação (Kg m^{-3});

MFFr = massa fresca dos frutos (Kg);

Volume total_{água} = volume total de água aplicado via irrigação após o transplântio (m^3).

Análise estatística

As variáveis referentes a crescimento e produtividade da cultura do tomateiro e produtividade da água de irrigação do tomateiro foram submetidas a análise de variância e teste F a 5% de probabilidade. Posteriormente, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Resultados

As informações referentes às propriedades hidráulicas do substrato (PHS) obtidas via modelagem inversa estão apresentadas na Tabela 2. Os indicadores estatísticos $R^2 = 0,978$, $MAE = 0,042 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $RMSE = 0,051 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ revelaram boa convergência da modelagem na otimização das PHS.

Tabela 2. Propriedades hidráulicas do substrato obtidas por modelagem inversa

$\theta_s(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$	$\theta_R(\text{m}^3 \text{ m}^{-3})$	$\alpha (\text{m}^{-1})$	$n (-)$	$\lambda (-)$	$K_s (\text{m dia}^{-1})$
$0,860 \pm 0,49$	$0,033 \pm 0,49$	$0,030 \pm 0,04$	$1,563 \pm 0,44$	$0,017 \pm 1,50$	$0,031 \pm 1,50$

A Figura 5 ilustra as variações do armazenamento de água no substrato calculado a partir dos valores do conteúdo volumétrico de água obtidos via TDR na fase I de desenvolvimento. O valor médio dos potenciais matriciais para o limite inferior no período de 8 dias para as condições de reposição da lâmina de irrigação necessária

para retornar à umidade do substrato aos potenciais matriciais de -6 e -14 kPa foram de $-39,80 \pm 2,52$ kPa e $-41,96 \pm 2,69$ kPa; e o valor médio dos potenciais matriciais para o limite superior foram de $-4,68 \pm 0,55$ kPa e $-9,04 \pm 0,62$ kPa. Os limites médios observados do volume de água armazenada nos vasos foram: $0,81 \pm 0,06$ litros e $1,9 \pm 0,06$ litros para faixa de potencial entre 6 a 40 kPa; $0,89 \pm 0,04$ litros e $1,52 \pm 0,05$ litros para faixa de potencial entre -14 a -40 kPa.

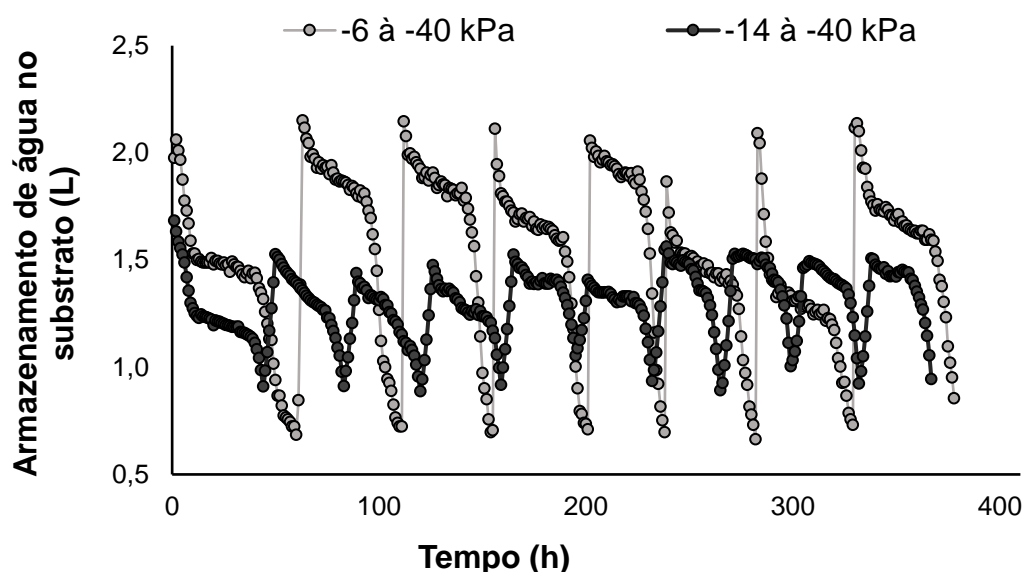


Figura 5: Variações no armazenamento de água no substrato de cultivo do tomate 'grape' submetido à -6 kPa e -14 kPa.

O volume acumulado de água aplicado na faixa 1 foi de 5,38, 30,50 e 35,63 L planta⁻¹, para as fases fenológicas vegetativa, florescimento e frutificação, respectivamente, totalizando um volume total de 71,50 L planta⁻¹ (Figura 6). Já na faixa 2 o volume acumulado de água aplicado foi de 4,20, 22,74 e 32,55 L planta⁻¹, respectivamente, para as fases fenológicas vegetativa, florescimento e frutificação, totalizando um volume total de 59,49 L planta⁻¹ (Figura 6). Portanto, o volume de água aplicado nas plantas submetidas à faixa -14 a -40 kPa foi inferior em aproximadamente 16,79%, quando comparado ao volume total acumulado aplicado nas plantas submetidas à faixa de -6 a -40 kPa.

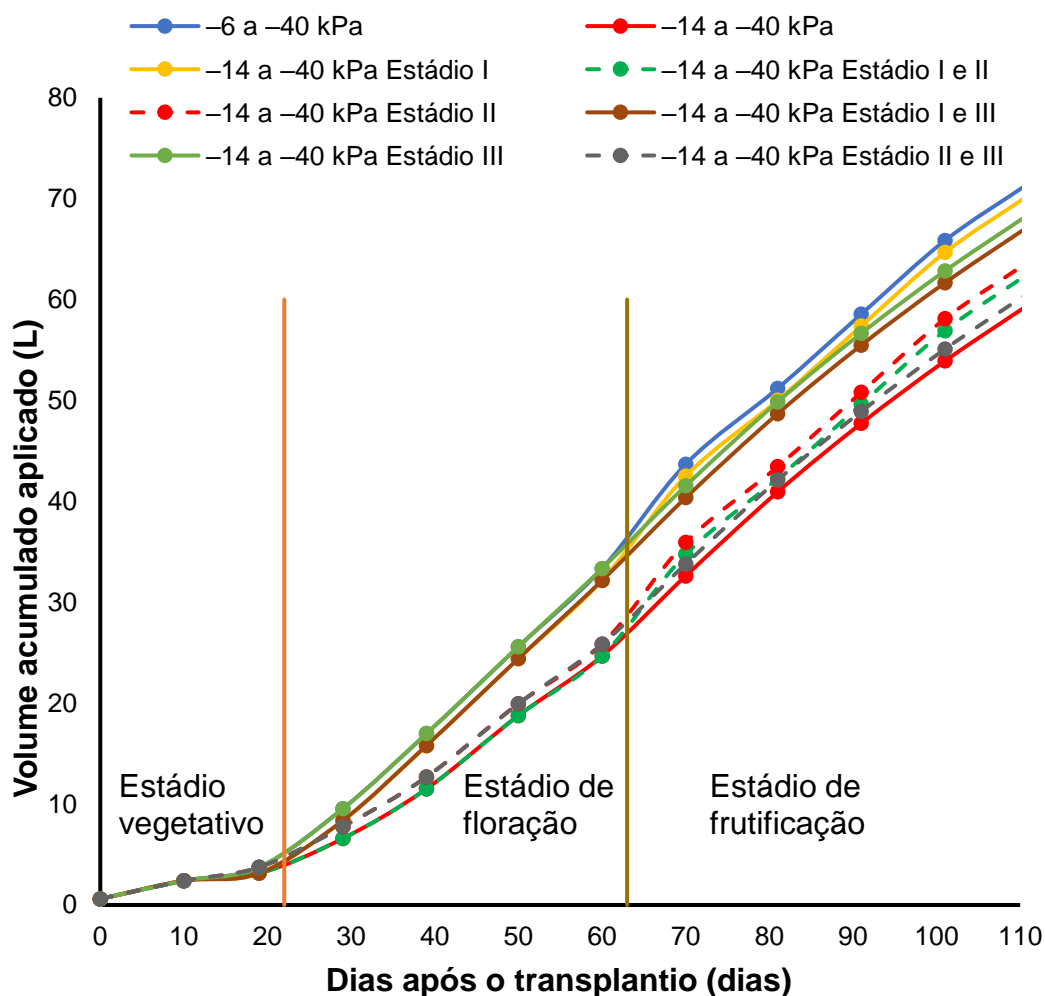


Figura 6: Volume acumulado de água aplicada por planta nas diferentes condições de reposição da lâmina de irrigação.

Comparando-se a condição de aplicação da faixa de potencial matricial da água no substrato de -14 a -40 kPa em apenas uma das fases de desenvolvimento da cultura com a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar o potencial matricial da água no substrato de -6 a -40 kPa em todo ciclo do cultivo, observou-se reduções da ordem de 1,65, 10,84 e 4,30% no consumo de água, respectivamente, para as fases I, II e III (Figura 6). E quando a condição de reposição da lâmina de irrigação que retornava o potencial matricial da água no substrato a faixa de -14 a -40 kPa foi aplicada para as fases I e II, I e III e II e III, a economia de água acumulada aplicada foi da ordem de 12,49, 5,95 e 15,14%, respectivamente (Figura 6).

Quando analisada a frequência e intervalo entre irrigações obtidas como efeito da aplicação das diferentes faixas de potencial, observou-se que para as fases

vegetativa, florescimento e frutificação foi em média de 48, 24 e 24 h para a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar o potencial matricial de água no substrato para -6 kPa e de 58, 18 e 15 h para a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar o potencial matricial de água no substrato para -14 kPa, respectivamente.

Para as condições de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar os potenciais matriciais de água no substrato para -6 e -14 kPa, observou-se que não houve efeito significativo a 5% de probabilidade para as variáveis de DC, NF e MSC, aos 25, 49, 75 e 103 DAT. Outras variáveis também não apresentaram efeito significativo, como: altura aos 25, 75 e 103 DAT; MFF aos 25 e 103 DAT; MFC aos 25, 75 e 103 DAT; MSF aos 49 e 103 DAT; e AF aos 25, 75 e 103 DAT. Já as variáveis altura aos 49 DAT, MFF aos 49 e 75 DAT, MFC aos 49 DAT, MSF aos 75 DAT e AF aos 49 DAT sofreram efeito significativo a 5% de probabilidade.

Para as variáveis que diferiram estatisticamente, a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar o potencial matricial de água no substrato para -14 kPa proporcionou reduções de aproximadamente: 9,77% para altura de planta aos 49 DAT; 30,10 e 27,46% para a MFF, aos 49 e 75 DAT, respectivamente; 30,74% para a MFC aos 49 DAT; 43,19% para MSF aos 75 DAT; e de 25% para a AF aos 49 DAT, quando comparadas a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar o potencial matricial de água no substrato para -6 kPa (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios de diâmetro do caule (DC), altura, massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do caule (MFC), número de folhas (NF), massa seca das folhas (MSF), massa seca do caule (MSC) e área foliar (AF) do tomateiro submetido a diferentes faixas de potencial de água no solo (Ψ).

Ψ m (kPa)	Valores médios							
	DC (mm)	Altura (cm)	MFF (g)	MFC (g)	NF	MSF (g)	MSC (g)	AF (m ²)
Primeira colheita – 25 DAT								
6 a 40	5,7a	79,7a	110,6a	55,9a	12,7a			0,3a
14 a 40	7,0a	85,0a	99,1a	57,8a	12,3a			0,2a
Segunda colheita – 49 DAT								
6 a 40	9,9a	177,3a	497,7a	249,1a	22,3a	56,4a	34,7a	0,9a
14 a 40	8,0a	160,0b	347,9b	172,5b	22,3a	41,9a	26,4a	0,7b
Terceira colheita – 75 DAT								
6 a 40	12,1a	269,0a	383,6a	295,1a	33,0a	49,9a	52,5a	0,6a
14 a 40	11,0a	279,0a	278,3b	258,3a	28,0a	28,4b	35,8a	0,5a
Quarta colheita – 103 DAT								
6 a 40	14,0a	383,7a	145,0a	440,9a	29,0a	22,5a	76,8a	0,2a
14 a 40	12,8a	395,7a	174,7a	454,2a	28,7a	27,0a	79,7a	0,3a

Quando analisado o efeito das condições de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar os potenciais matriciais da água no substrato para -6 e -14 kPa nas variáveis de produção (Prod), número de frutos (NFr) e produtividade da água de irrigação (Prod_{água}), observou-se que apenas a Prod_{água} sofreu efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. Efeito não significativo foi encontrado para as condições de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar à umidade do substrato ao potencial matricial de -14 kPa, quando aplicado apenas na fase I, II ou III e/ou quando aplicado nas fases I e II, I e III e II e III, para as variáveis Prod, NFr e Prod_{água}.

Para a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar o potencial matricial da água no substrato para -14 kPa em todo o ciclo da cultura, a Prod_{água} foi 17,70% superior, quando comparada a condição de reposição da lâmina

de irrigação necessária para retornar o potencial matricial de água no substrato para -6 kPa (Tabela 4).

Tabela 4. Valores médios da produção (Prod), número de frutos (NFr) e produtividade da água de irrigação ($Prod_{\text{água}}$) no cultivo do tomateiro considerando diferentes faixas de potencial matricial da água no substrato aplicadas em distintas fases do ciclo da cultura.

Potencial matricial $ \Psi_m $	Fases de cultivo	Valores médios		
		Prod (g)	NFr	$Prod_{\text{água}}$ (kg m^{-3})
6 a 40 kPa	Ciclo completo	2253,76a	210,62a	31,52b
14 a 40 kPa	Ciclo completo	2207,28a	182,40a	37,10a
14 a 40 kPa	Fase I	2346,43a	222,50a	33,67a
14 a 40 kPa	Fase II	1952,28a	174,83a	30,63a
14 a 40 kPa	Fase III	2414,37a	199,83a	35,29a
14 a 40 kPa	Fase I e II	2079,08a	176,83a	33,23a
14 a 40 kPa	Fase I e III	2384,88a	188,17a	35,47a
14 a 40 kPa	Fase II e III	2094,66a	195,20a	34,53a

Discussão

A diferença em relação ao volume total de água aplicado nas plantas submetidas às duas faixas de potencial -6 a -40 kPa e -14 a -40 kPa (Figura 6), pode ser devido a diferença da AF que estatisticamente não apresentaram diferenças significativas, porém existem diferenças em valores absolutos. Os valores absolutos de AF para a faixa de potencial entre -6 a -40 kPa foram superiores aos valores encontrados para a faixa entre -14 e -40 kPa, em aproximadamente 33, 22 e 16% para as análises destrutivas realizadas aos 25, 49 e 75 DAT.

A diferença em relação ao volume total de água aplicado pode ser explicada também devido ao fato de que existe uma relação linear entre o fluxo de evaporação e a umidade do solo, até o momento em que a linearidade é inexistente e a velocidade de evaporação é muito lenta (Lemon, 1956). Esse fenômeno físico de perda de água do solo por evaporação citado por Lemon (1956), pode explicar tal diferença em

relação ao volume total de água aplicado, visto que a realização do manejo da irrigação foi automatizada, tendo o limite crítico de água no substrato fixo para ambas as condições de manejo da irrigação e variando apenas o limite superior de água no substrato. Sendo assim, o potencial matricial de água no substrato referente ao limite superior de água no substrato pode ser reduzido e proporcionar menores perdas de água por evaporação.

Quando a faixa 2 foi aplicada em apenas uma das fases de desenvolvimento da cultura e para as fases I e II, I e III e II e III, observou-se que os maiores percentuais de economia de água ocorreram quando esta faixa foi aplicada na fase II. Essa redução pode ser explicada pelo fato de que o fluxo de evaporação de água de um meio poroso diminui com a diminuição da umidade (Lemon, 1956). Associado ao fenômeno de perda de água por evaporação, pode ser atribuído o maior índice de área foliar da planta cobrindo o vaso de cultivo durante o estágio fenológico de floração, visto que na fase vegetativa as plantas (mudas) apresentavam baixo índice de área foliar e na fase de frutificação o índice de área foliar próximo ao vaso de cultivo foi baixo devido a poda das folhas (retirada das folhas abaixo da(s) penca(s) de tomate colhido). Em um estudo realizado por Wang et al. (2020) na cultura do tomateiro cultivada em solo e em ambiente protegido, verificaram que a maior intensidade de perda de água por evaporação ocorreu na fase de mudas, correspondente a fase fenológica de menor índice de área foliar.

Em relação a maior frequência de irrigação para a condição de reposição da lâmina de irrigação necessária para retornar à umidade do substrato ao potencial matricial de -14 kPa, deve-se facilmente a menor faixa de armazenamento de água associada à rotina de programação de ligar/desligar o sistema (Figura 5).

Os efeitos não significativos para as variáveis de Prod e NFr nas condições de potenciais matriciais de água no substrato variando de -6 a -40 kPa e de -14 a -40 kPa devem-se provavelmente ao fato de que a cultura do tomateiro, em ambas as condições de manejo da irrigação foram submetidas ao mesmo valor crítico inferior. Trabalhos realizados por Wang et al. (2007) (cultivando *Solanum lycopersicum* Mill., cv. Shijihongguan) e Zheng et al. (2013) (cultivando o *Lycopersicon esculentum* L-402), potenciais matriciais de água no solo superiores a -50,00 e -40,00kPa, respectivamente, também não verificaram diminuição do rendimento da cultura do tomateiro cultivada em solo.

Em um estudo realizado por Coolong et al. (2011) no ano de 2009, ao avaliarem o tomate "Mountain Fresh" submetido as tensões de água no solo variando entre -30 e -10, -30 e -25, -45 e -10 e -45 e -40kPa, observou-se que o rendimento da cultura não foi afetado significativamente em nenhuma dessas condições de manejo da irrigação.

Estes resultados não significativos para o presente estudo sugerem que a faixa de potencial matricial de água no substrato de -14 a -40 kPa proporciona redução na aplicação de água, quando comparado a faixa de potencial matricial de -6 a -40 kPa, sem proporcionar diferenças significativas no rendimento da cultura. Além disso, evidencia que quando o limite superior não retorna à capacidade máxima de armazenamento de água do substrato (-6 kPa), a Prod_{água} é maior estatisticamente (Tabela 4).

Sendo assim, torna-se recomendável a experimentação de outras faixas de cultivo do tomateiro, visto que a alteração e/ou redução do limite superior de água no substrato adotado para a realização do manejo da irrigação pode proporcionar reduções na aplicação de água.

Conclusões

A aplicação da faixa de potencial matricial entre -14 e -40 kPa em uma ou duas diferentes fases fenológicas da cultura do tomateiro, não proporcionará reduções significativas na produtividade da água e nem na produtividade da cultura.

Como forma de subsidiar preliminarmente o manejo automático da irrigação via SAS, evitando desperdício de água, nutrientes e energia, recomenda-se os limites de potencial entre -14 e -40 kPa como referências para o momento de ligar e desligar o sistema, embora outros valores devam ser estudados e comparado a estes por estudos futuros.

O manejo da irrigação realizado a partir do conhecimento da umidade do substrato referente aos potenciais matriciais de água do substrato no limite superior adotado, no ponto crítico a cultura e no ponto de murcha permanente e por sistema de automação via SAS possibilita a manutenção da umidade no substrato na faixa entre o limite superior adotado e ponto crítico a cultura, oferecendo assim as condições ideais de água no substrato para o desenvolvimento potencial da cultura.

Referências

ABAURRE, M. E. O. Práticas culturais. In: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper). **Tomate**. Vitória, ES: Incaper, 2010. p. 133-148.

AL NADDAF, O.; LIVIERATOS, I.; STAMATAKIS, A.; TSIROGIANNIS, I.; GIZAS, G.; SAVVAS, D. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags. **Scientia horticultrae**, v. 129, n. 1, p. 135-141, 2011.

AN, S. K.; LEE, H. B.; KIM, J.; KIM, K. S. Soil moisture sensor-based automated irrigation of Cymbidium under various substrate conditions. **Scientia Horticulturae**, p. 110133, 2021.

ANDRIOLO, J. L.; DUARTE, T. D. S.; LUDKE, L.; SKREBSKY, E. C. Crescimento e desenvolvimento do tomateiro cultivado em substrato com reutilização da solução nutritiva drenada. **Horticultura Brasileira**, v. 21, p. 485-489, 2003.

BATEMAN, A. M.; ERICKSON, T. E.; MERRITT, D. J.; VENEKLAAS, E. J.; MUÑOZ-ROJAS, M. Water availability drives the effectiveness of inorganic amendments to increase plant growth and substrate quality. **Catena**, v. 182, p. 104116, 2019.

COOLONG, T.; SURENDRAN, S.; WARNER, R. Evaluation of irrigation threshold and duration for tomato grown in a silt loam soil. **HortTechnology**, v. 21, n. 4, p. 466-473, 2011.

GONG, X.; QIU, R.; SUN, J.; GE, J.; LI, Y.; WANG, S. Evapotranspiration and crop coefficient of tomato grown in a solar greenhouse under full and deficit irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 235, p. 106154, 2020.

HOOSHMAND, M.; ALBAJI, M.; NASAB, S. B.; ZADEH ANSARI, N. A. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran. **Scientia Horticulturae**, v. 254, p. 84-90, 2019.

LEMON, EDGAR R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 1, p. 120-125, 1956.

LI, H.; LIU, H.; GONG, X.; LI, S.; PANG, J.; CHEN, Z.; SUN, J. Optimizing irrigation and nitrogen management strategy to trade off yield, crop water productivity, nitrogen use efficiency and fruit quality of greenhouse grown tomato. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106570, 2021.

LIU, H.; YIN, C.; GAO, Z.; HOU, L. Evaluation of cucumber yield, economic benefit and water productivity under different soil matric potentials in solar greenhouses in North China. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106442, 2021.

MARTINEZ H, E. P. **Manual prático de hidroponia**. 3. ed. Minas Gerais: Aprenda fácil, 2017.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water resources research**, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NICK, C.; SILVA, D.; BORÉM, A. **Tomate do Plantio à Colheita**. 1. ed. Minas Gerais: Editora UFV, 2018.

PARADA, F.; GABARRELL, X.; RUFÍ-SALÍS, M.; ARCAS-PILZ, V.; MUÑOZ, P.; VILLALBA, G. Optimizing irrigation in urban agriculture for tomato crops in rooftop greenhouses. **Science of the total environment**, v. 794, p. 148689, 2021.

PENG, Z.; SMITH, C.; STOVIN, V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125273, 2020.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

SANTIAGO, E. J. P.; DE OLIVEIRA, G. M.; RAMOS, M. D. M. V. B.; DE CARVALHO ROCHA, R.; PEREIRA, A. V. A. Qualidade do tomate cereja cultivado sob lâminas de irrigação em ambiente protegido e campo aberto. **Agrometeoros**, v. 26, n. 1, 2018.

SASIDHARAN, S.; BRADFORD, S. A.; ŠIMŮNEK, J.; KRAEMER, S. R. Drywell infiltration and hydraulic properties in heterogeneous soil profiles. **Journal of hydrology**, v. 570, p. 598-611, 2019.

SCHINDLER, U.; MÜLLER, L.; EULENSTEIN, F. Hydraulic performance of horticultural substrates-1. Method for measuring the hydraulic quality indicators. **Horticulturae**, v. 3, n. 1, p. 5, 2017.

SHARMA, V.; IRMAK, S. Comparative analyses of variable and fixed rate irrigation and nitrogen management for maize in different soil types: Part II. Growth, grain yield, evapotranspiration, production functions and water productivity. **Agricultural Water Management**, v. 246, p. 106653, 2021.

SILVA, A. J. P.; PINHEIRO, E. A. R.; VAN LIER, Q. D. J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. **Irrigation Science**, p. 1-12, 2020.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water and Solutes in the Soil. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA, p. 343, 2013.

SOLDATELI, F. J.; BATISTA, C. B.; GODOY, F.; MELLO, A. C.; DOS SANTOS SOARES, F.; BERGMANN, M. D.; ETHUR, L. Z. Crescimento e produtividade de cultivares de tomate cereja utilizando substratos de base ecológica. **Colloquium Agrariae**, v. 16, n.1, p. 1-10, 2020.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

WANG, X.; WANG, S.; GEORGE, T. S.; DENG, Z.; ZHANG, W.; FAN, X.; LV, M. Effects of schedules of subsurface drip irrigation with air injection on water consumption, yield components and water use efficiency of tomato in a greenhouse in the North China Plain. **Scientia Horticulturae**, v. 269, p. 109396, 2020.

WANG, D.; KANG, Y.; WAN, S. Effect of soil matric potential on tomato yield and water use under drip irrigation condition. **Agricultural Water Management**, v. 87, n. 2, p. 180-186, 2007.

WU, Y.; YAN, S.; FAN, J.; ZHANG, F.; XIANG, Y.; ZHENG, J.; GUO, J. Responses of growth, fruit yield, quality and water productivity of greenhouse tomato to deficit drip irrigation. **Scientia Horticulturae**, v. 275, p. 109710, 2021.

ZHENG, J.; HUANG, G.; JIA, D.; WANG, J.; MOTA, M.; PEREIRA, L. S.; HUANG, Q.; XU, X.; LIU, H. Responses of drip irrigated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) yield, quality and water productivity to various soil matric potential thresholds in an arid region of Northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 129, p. 181-193, 2013.

ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, M. F. D.; FERNANDES JÚNIOR, F. Caracterização física de substratos para plantas. **Bragantia**, v. 73, n. 3, p. 300-311, 2014.

CAPÍTULO II

VARIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO AFETA A MODELAGEM AGRO-HIDROLÓGICA E MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO TOMATEIRO

VARIAÇÃO TEMPORAL DAS PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SUBSTRATO AFETA A MODELAGEM AGRO-HIDROLÓGICA E MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO TOMATEIRO

RESUMO: A zona radicular é a região de maior importância para o monitoramento da água no solo visando o manejo da irrigação. O desenvolvimento das raízes ao longo do ciclo de cultivo pode alterar as características da zona radicular, tais como densidade, porosidade, condutividades e retenção de água, ao ponto de reduzir a precisão no cálculo da lâmina de irrigação e modelagem agro-hidrológica, quando tais características são determinadas antes do cultivo. Objetivou-se com este trabalho avaliar se há variação nas propriedades hidráulicas do substrato (PHS) ao longo do ciclo de crescimento do tomateiro e como estas alterações impactam o manejo da irrigação e as simulações agro-hidrológicas. O cultivo ocorreu em vasos de 8 L preenchidos com substrato, no interior de uma casa de vegetação constituída por tela antiafídeo lateralmente e filme plástico na cobertura. As plantas foram fertirrigadas por gotejamento automatizado, sendo adotado uma faixa de potencial matricial de água no substrato (Ψ) variando entre -6 kPa e -40 kPa. As PHS foram estimadas por modelagem inversa utilizando o modelo Hydrus 1D a partir de um experimento de evaporação. O conteúdo de água no substrato foi monitorado por sensores GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) e TDR100 (Campbell Scientific, INC., Logan, Utah, USA). Uma plataforma de pesagem foi utilizada para determinar a evapotranspiração real da cultura. O modelo agro-hidrológico SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) foi utilizado para avaliar os efeitos das PHS determinadas antes do cultivo (PHS_{ac}) para todo o ciclo da cultura e PHS determinadas durante o cultivo (PHS_{dc}) (variável conforme o estágio fenológico da cultura) sobre o manejo da irrigação. A lâmina de irrigação calculada com os PHS_{ac} e PHS_{dc} proporcionaram RMSE de 0,4250 e 0,2336 L, respectivamente, quando comparado aos valores observados. O aumento da densidade radicular alterou as PHS_{dc} , aumentando a capacidade de retenção e disponibilidade de água, conseqüentemente, afetando a frequência de irrigação.

PALAVRAS CHAVES: *Solanum lycopersicum* L., manejo da irrigação, modelagem agro-hidrológica, propriedades hidráulicas do substrato.

TEMPORAL VARIATION OF THE HYDRAULIC PROPERTIES OF THE SUBSTRATE AFFECTS AGRO-HYDROLOGICAL MODELING AND MANAGEMENT OF TOMATO IRRIGATION

ABSTRACT: The root zone is the most important region for monitoring soil water for irrigation management. The development of roots throughout the cultivation cycle can change the characteristics of the root zone, such as density, porosity, conductivity and water retention, to the point of reducing the precision in calculating the irrigation depth and agro-hydrological modeling, when such characteristics are determined before cultivation. The objective of this work was to evaluate whether there is variation in the hydraulic properties of the substrate (PHS) throughout the tomato growth cycle and how these changes impact irrigation management and agro-hydrological simulations. Cultivation took place in 8 L pots filled with substrate, inside a greenhouse consisting of an anti-aphid screen on the side and plastic film on the roof. The plants were fertigated using automated dripping, adopting a range of water matrix potential in the substrate (Ψ) varying between -6 kPa and -40 kPa. The PHS were estimated by inverse modeling using the Hydrus 1D model from an evaporation experiment. The water content in the substrate was monitored by GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) and TDR100 (Campbell Scientific, INC., Logan, Utah, USA) sensors. A weighing platform was used to determine the actual evapotranspiration of the crop. The agro-hydrological model SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) was used to evaluate the effects of PHS determined before cultivation (PHS_{ac}) for the entire crop cycle and PHS determined during cultivation (PHS_{dc}) (variable depending on the phenological stage of the crop) on irrigation management. The irrigation depth calculated with PHS_{ac} and PHS_{dc} provided RMSE of 0.4250 and 0.2336 L, respectively, when compared to observed values. The increase in root density changed PHS_{dc} , increasing water retention capacity and availability, consequently affecting irrigation frequency.

KEYWORDS: *Solanum lycopersicum* L., irrigation management, agro-hydrological modeling, substrate hydraulic properties.

Introdução

Em cultivos irrigados é necessário a prática do manejo da irrigação que visa a reposição adequada da água utilizada no processo de evapotranspiração a fim de potencializar o desenvolvimento e rendimento das culturas e o uso eficiente da água. O manejo adequado da irrigação reduz a percolação profunda de água, evitando assim a lixiviação de íons nutrientes. O manejo da irrigação pode ser realizado via variáveis obtidas na planta, na atmosfera e no solo/substrato. Quando realizado via variáveis do substrato, faz-se necessário o conhecimento das propriedades hidráulicas do substrato (PHS) que indicam a capacidade de retenção e a disponibilidade de água.

Geralmente as PHS são determinadas antes do plantio (Cheng et al. (2022), Bai et al. (2021), Li e Ren (2019), Jiang et al. (2016), Chen et al. (2013) e Jiang et al. (2011). Entretanto, com a evolução do desenvolvimento da cultura há consistente desenvolvimento do sistema radicular que pode afetar as PHS, implicando em alterações nas características de retenção e disponibilidade de água do solo/substrato. Para a cultura do tomate em ambiente protegido, uma das formas de cultivo é o plantio em vasos preenchidos com substrato (Soldateli et al., 2020; Hooshmand et al., 2019). O desenvolvimento radicular de cultivos em vasos é limitado pelo volume do substrato acondicionado dentro do vaso, isso pode proporcionar mudanças significativas nas PHS ao longo do ciclo da cultura (Michel e Kerloch, 2017; Cannavo e Michel, 2013).

Dada a importância das PHS para o manejo da irrigação, pesquisas anteriores avaliaram o efeito do tamanho das partículas de substrato sobre a distribuição radicular, aeração e disponibilidade de água (Cannavo e Michel, 2013; Richards et al., 1986); os efeitos dos tamanhos das partículas de substrato sobre as PHS em diferentes profundidades do vaso para potencial de água constante de -1 kPa (Cannavo e Michel, 2013); a influência da granulometria do substrato sobre os parâmetros físicos, químico e fitotoxicidade conforme o envelhecimento (Chemetova et al., 2019); e os efeitos sobre as propriedades físicas, química e da curva de retenção a partir da combinação de solo mais resíduos orgânicos para cultivo em vasos (Farhain et al., 2022). No entanto, a determinação das PHS ao longo do ciclo da cultura e os seus efeitos sobre o manejo da irrigação não são considerados.

Dentre as PHS que podem ser alteradas ao longo do ciclo da cultura, têm-se a curva de retenção de água no substrato (SWRC) e a condutividade hidráulica não

saturada do substrato (Michel e Kerloch, 2017; Cannavo e Michel, 2013). A SWRC pode ser descrita a partir de modelos paramétricos, sendo mais utilizado o modelo de Van Genuchten (1980) (Farhain et al., 2022; Michel e Kerloch, 2017; Cannavo e Michel, 2013), que relaciona o conteúdo de água do substrato e o potencial matricial, podendo-se assim, determinar a disponibilidade total de água (DTA) e a faixa de água facilmente disponível (AFD) para a cultura.

Dentre os métodos de determinação da SWRC encontrados na literatura, têm-se os de equilíbrio estático, tais como, o psicrômetro utilizado por Bateman et al. (2019), tensiometria conforme utilizado por Schindler et al. (2017), caixa de areia utilizada por Al Naddaf et al. (2011), mesa de tensão para substrato (Michel e Kerloch, 2017; Cannavo e Michel, 2013), método da coluna suspensa (Peng et al., 2020) e a Câmara de Richards (Peng et al., 2020). Para a determinação da SWRC de cultivos em vaso, normalmente é utilizado a mesa de tensão, limitada ao potencial mátrico de -10 kPa, seguindo as recomendações de De Boodt e Verdonck (1971). No entanto, a SWRC do meio de crescimento das raízes deve abranger uma faixa de potencial mátrico de água entre a zona saturada e o ponto de murcha permanente (De Boodt, 1971), permitindo a determinação de variáveis importantes ao manejo da irrigação e do balanço hídrico, como a porosidade de aeração, AFD e DTA.

Outra forma de determinar a SWRC é a partir da modelagem inversa (IM), que consiste na utilização de um modelo numérico baseado na discretização da equação de Richards capaz de simular variações espaço-temporal do conteúdo de água ou do potencial matricial em condições transientes. A SWRC por IM pode ser determinada utilizando o Software Hydrus – 1D (Simunek et al., 2013), conforme utilizado por Silva et al. (2020) e Sasidharan et al. (2019). A IM possui algumas vantagens em relação aos métodos convencionais para a determinação da SWRC, podendo suprir as limitações quanto ao mau contato entre a placa porosa e a amostra de solo (De Jong van Lier e Pinheiro, 2019; Costa et al., 2008) e obter valores de conteúdo de água mais verídicos referente ao potencial mátrico próximo ao ponto de murcha permanente (Silva et al., 2020).

As propriedades hidráulicas obtidas por IM no Software Hydrus 1D podem ser utilizadas para simular a variação temporal do conteúdo de água no substrato, utilizando a opção de simulação “forward” dos modelos agro-hidrológicos, como o próprio Hydrus-1D e o SWAP-1D (Kroes et al., 2017). O modelo SWAP possui um módulo genérico de crescimento de cultura (WOFOST), que permite simular tanto o

crescimento detalhado como o simplificado de uma cultura anual (Kroes et al., 2017). O modelo WOFOST simula em detalhes os processos fotossintéticos e de desenvolvimento da cultura (Boogaard et al., 2014). Dessa forma, torna-se possível a simulação de diferentes cenários de manejo da irrigação (Zhao et al., 2020; Li e Ren, 2019; Jiang et al., 2016), utilizando diversas condições de contorno, como por exemplo, variando as PHS obtidas em diferentes fases de desenvolvimento das raízes da planta ao longo do ciclo de cultivo.

Outros parâmetros físicos do substrato importantes na sua caracterização são a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade. A macroporosidade do substrato é um parâmetro importante para avaliar a aeração do meio de cultivo, pois as formulações de substrato possuem alta capacidade de retenção de água (Richards et al., 1986). Para a porosidade total (PT) do substrato, alguns estudos indicam que a faixa recomendável para o bom desenvolvimento de uma planta está entre 50 e 85% (Pardossi et al., 2011).

Diante disso, o objetivo desta pesquisa é avaliar se há variação nas propriedades hidráulicas do substrato ao longo do ciclo de crescimento do tomateiro e como estas alterações impactam o manejo da irrigação e as simulações agro-hidrológicas.

Metodologia

Caracterização do experimento em ambiente protegido

Realizou-se um experimento no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – Campus Governador Mangabeira, localizado no município de Governador Mangabeira, Estado da Bahia, Brasil, nas coordenadas geográficas 12°36'30,53" S e 39°01'51,71" W e altitude em relação ao nível médio do mar de 215 m.

Cultivou-se tomate do tipo grape, variedade “Cocktail híbrido Mascot F1” em ambiente protegido (casa de vegetação), no período de 20 de maio e 16 de outubro de 2020. A casa de vegetação utilizada é do tipo “teto em arco” (com orientação no sentido leste/oeste), possuindo 27 m de comprimento, 6 m de largura e 3 m de pé-direito. A estrutura da casa de vegetação foi constituída por tela tipo antiafídeo nas laterais e por um filme plástico do tipo anti UV 150 nm na cobertura.

No interior da casa de vegetação foram alocados 245 vasos de polietileno, com capacidade individual de 8 L. Os vasos foram distribuídos em 7 linhas de cultivo, sendo as duas linhas mais próximas das laterais da casa de vegetação utilizadas como bordaduras. O espaçamento entre vasos foi 1 m entre linhas e 0,5 m entre plantas. Os vasos de polietileno foram preenchidos com substrato comercial composto por calcário, turfa de sphagnum, fibra de coco e casca de arroz, possuindo uma densidade de matéria seca de 160 kg m^{-3} e pH de 6,5. Na parte inferior do vaso foi colocada uma camada de 0,02 m de brita número “1” para permitir a drenagem.

Ao longo do ciclo da cultura, a adubação nutricional foi realizada por fertirrigação, seguindo as recomendações de Nick et al. (2018) e Martinez (2017). Para isso, realizou-se o acompanhamento da condutividade elétrica do substrato (CE_{sub}) a partir de extratores de cápsulas porosas instalados a 0,1 m de profundidade nos vasos de cultivo. O monitoramento da CE_{sub} ocorreu a cada três dias. A CE_{sub} variou ao longo do ciclo do tomateiro entre 1,9 e 2,9 dS m^{-1} , mantendo-se na faixa ideal entre 1,8 dS m^{-1} (condutividade elétrica da solução nutritiva utilizando água de 0,25 dS m^{-1} e os íons nutrientes dos fertilizantes utilizados para o cultivo do tomateiro) e 4,9 dS m^{-1} adotada a partir do trabalho realizado por Andriolo et al. (2003).

O manejo da irrigação foi automatizado a partir da técnica do sensoriamento da água no substrato. Para a automação foi utilizado um conjunto motobomba (1/4 cv), válvula solenoide, placa Arduino e sensores GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA). O sistema de irrigação localizada por gotejamento (emissores gotejadores com vazão de $3,6 \text{ L h}^{-1}$) era ligado quando o potencial mátrico do substrato atingia o valor de -40 kPa e desligado quando este atingia -6 kPa, aplicando o volume de água calculado a partir da equação 1.

$$V_{\text{água}} = (\theta_{-6 \text{ kPa}} - \theta_{\text{critico}}) \times V_{\text{molhado}} \quad (1)$$

Em que,

$V_{\text{água}}$ = volume de água da irrigação (L);

$\theta_{-6 \text{ kPa}}$ = conteúdo de água no substrato referente ao potencial mátrico de -6 kPa;

θ_{critico} = conteúdo de água no substrato referente ao potencial crítico de -40 kPa a planta;

V_{molhado} = volume a ser molhado de substrato no vaso (L).

A faixa de potencial mátrico de água no substrato entre -6 kPa e -40 kPa foi utilizada para a calibração do modelo agro-hidrológico SWAP, utilizando o módulo genérico simplificado WOFOST de crescimento da cultura. Para a calibração do modelo SWAP/WOFOST utilizou os dados observados do $\theta_{\text{Substrato}}$, que foram comparados com os valores estimados no SWAP. Os valores estimados de $\theta_{\text{Substrato}}$ foram obtidos de duas formas: i) determinação dos parâmetros hidráulicos do substrato antes do cultivo (PHS_{ac}) e utilização fixa dos resultados obtidos para simulação de processos hidrológicos em todo o ciclo da cultura; ii) determinação dos parâmetros hidráulicos do substrato durante o cultivo (PHS_{dc}) e utilização variável dos resultados obtidos para simulação de processos hidrológicos em todo o ciclo da cultura.

As duas condições de simulação foram utilizadas também para avaliar os efeitos do desenvolvimento do sistema radicular do tomateiro sobre as PHS e características físicas do substrato, assim como, a influência nos cálculos realizados para o cálculo da lâmina de irrigação.

Determinação dos parâmetros hidráulicos e das características físicas do substrato

A determinação dos parâmetros hidráulicos do substrato (PHS) ocorreu por meio de um experimento de modelagem inversa, utilizando o software HYDRUS – 1D, version 4.16.0110 (Simunek et al., 2013). Para isso, instalou-se um sensor de conteúdo de água modelo GS1 (Decagon), na profundidade de 0,05 m em três lisímetros de pesagem. O lisímetro de pesagem foi composto por uma plataforma de pesagem e um vaso de cultivo de 8 L. A determinação dos parâmetros hidráulicos do substrato (PHS) para cada um dos lisímetros foi realizada de acordo com a condição de cultivo do substrato, sendo: $\text{PHS}_{\text{ac-vegetativa}}$ (substrato inicial antes do cultivo); $\text{PHS}_{\text{dc-floração}}$ (substrato cultivado com o tomateiro na fase de floração); e, $\text{PHS}_{\text{dc-frutificação}}$ (substrato cultivado com o tomateiro na fase de frutificação).

Os lisímetros de pesagens foram saturados com o dreno fechado. O substrato do lisímetro secou gradativamente pelo processo de evaporação. As variações do conteúdo de água no substrato e a variação de massa registrada na plataforma de pesagem devido à perda de água por evaporação, foram medidas e armazenadas em

um datalogger modelo “CR800 Campbell Scientific” em intervalos de 15 minutos, durante um período de 37 dias para o PHS_{ac-vegetativa} e de 24 dias para os PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação}.

Os dados da variação do conteúdo de água no substrato juntamente com o fluxo de evaporação foram inseridos no software HYDRUS – 1D, para resolução da equação de Richards (Richards, 1931), equação 2, que estima o fluxo de água em meios porosos.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2)$$

Em que,

Ψ = potencial mátrico do substrato (m);

θ = conteúdo de água no substrato ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

t = tempo (h);

z = coordenada vertical (m);

$K(\Psi)$ = representa a função condutividade hidráulica do substrato (m h^{-1}).

Para descrever a SWRC e a condutividade hidráulica do substrato (SWCC) utilizou-se as equações análticas de van Genuchten-Mualem- (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980), Equações 3 e 4.

$$\begin{cases} \theta(\Psi) = \theta_s & \Psi \geq 0 \\ \theta(\Psi) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + |\alpha\Psi|^n} \right]^{(1-\frac{1}{n})} & \Psi < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 \quad (4)$$

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (5)$$

Em que,

θ_r = conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s = conteúdo de água saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

Ψ = potencial mátrico (m);

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica não saturada do substrato ($m\ h^{-1}$);

K_s = condutividade hidráulica saturada do substrato ($m\ h^{-1}$);

S_e = saturação efetiva,

α , n e λ = parâmetros empíricos.

No software HYDRUS-1D, a determinação dos parâmetros hidráulicos do substrato (θ_r , θ_s , α , n , λ e K_s) foi realizada pela minimização dos erros entre os teores de água (θ) observados e simulados no espaço e no tempo. Para isso, utilizou-se o total das diferenças obtidas entre os valores de θ observados e simulados, podendo ser expressa a partir de uma função objetiva (Φ) (Equação 6).

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} [\theta_{TDR,j}(z_i, t_i) - \theta_{EST,j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (6)$$

Em que,

Φ = função objetiva;

θ_{TDR} = conteúdo de água medido no substrato;

θ_{EST} = conteúdo de água estimado para o substrato utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados em β (θ_r , θ_s , α , n , λ e K_s);

t_i = horário (tempo) da leitura;

z_i = posicionamento do sensor de umidade;

j = número de leituras realizadas no mesmo ponto;

m = número de diferentes locais de medidas de umidade;

n = número de medidas realizadas.

Nota-se na equação 9, que o lado direito da equação refere-se ao resíduo entre os somatórios dos valores do conteúdo de água observados pelo sensor GS1 no tempo t_i para j medidas em z_i e os correspondentes valores de conteúdo de água estimados utilizando os parâmetros do substrato otimizados em β . Para minimizar a função objetiva (Φ) foi utilizado o método não linear de Levenberg-Marquardt.

De posse das PHS (Tabela 1), determinou-se os pares de valores ($\theta \times \Psi$) que representam os limites críticos para o manejo da irrigação.

Tabela 1: Parâmetros hidráulicos do substrato antes do cultivo (PHSac-vegetativa), durante o cultivo para a fase de floração (PHSdc-floração) e durante o cultivo para a fase de frutificação (PHSdc-frutificação)

Parâmetros hidráulicos do substrato (PHS)	PHSac-vegetativa	PHSdc-floração	PHSdc-frutificação
$\theta_s(m^3 m^{-3})$	0.86	0.78	0.78
$\theta_R(m^3 m^{-3})$	0.0325±0,49	0.0010±0,05	0.0213±0,49
$\alpha (m^{-1})$	0.0301±0,04	0.0149±0,01	0.0111±0,01
$n (-)$	1.5627±0,44	2.3810±1,08	2.0892±2,42
$\lambda (-)$	0.0165±1,50	0.0026±1,35	0.0817±2,07
$K_s (m dia^{-1})$	0.0309±1,50	0.0167±2,28	0.0223±3,57
R^2	0,9747	0,9911	0,9859

Em que, θ_s = conteúdo de água saturado no substrato; θ_R = conteúdo de água residual no substrato; α , n e λ = parâmetros empíricos da equação de ajuste de Van Genuchten; K_s = condutividade hidráulica saturada do substrato; d = densidade do substrato seco.

Para a determinação da porosidade total (PT) foi utilizado o peso de saturação a 0 kPa, conforme utilizado por Farhain et al. (2022) (Equação 7).

$$PT = \frac{M_{sat} - MSS}{V_T} \quad (7)$$

Em que:

PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$);

M_{sat} = massa saturada da amostra;

MSS = massa seca da amostra;

V_T = volume total da amostra.

Já a macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi), foram determinadas conforme as equações 8 e 9, respectivamente.

$$Ma = \left(\frac{M_{sat} - M_{-6kPa}}{V_T} \right) \times 100 \quad (8)$$

Em que,

Ma = macroporosidade (%);

M_{-6kPa} = massa da amostra referente ao potencial mátrico no substrato de -6 kPa.

$$Mi = \left(\frac{M_{-6kPa} - MSS}{V_T} \right) \times 100 \quad (9)$$

Em que,

Mi = microporosidade (%);

Modelo SWAP

O SWAP é um modelo agro-hidrológico de base física que integra solo, planta e atmosfera, permitindo simular os processos de transferência de água, solutos e calor em condições saturadas e não saturadas na presença ou não de crescimento de plantas no solo (Kroes et al., 2017; Droogers et al., 2010). O modelo SWAP é bastante robusto na simulação dos componentes do balanço hídrico de solos vegetados. Para o presente trabalho, o modelo SWAP foi utilizado para simular a variação temporal do teor de água do substrato ($\theta_{\text{substrato}}$) em intervalos de tempo de uma hora. Para o cálculo do fluxo de água em solos saturados e insaturados de solos vegetados, o modelo SWAP utiliza a equação de Richards (Equação 10) acoplada a um termo sumidouro que representa a extração de água por raízes.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) - S(\Psi) \right] \quad (10)$$

Em que,

θ = conteúdo de água no meio poroso (m^3m^{-3});

t = tempo (h);

Ψ = potencial matricialdo substrato (m);

z = coordenada vertical (m);

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica do substrato em função do conteúdo de água ($cm\ h^{-1}$);

$S(\Psi)$ = taxa de extração de água pelo sistema radicular (h^{-1}).

As relações entre θ , Ψ e K são descritas a partir das equações 4 e 5 de Van Genuchten (1980) e Mualem (1976).

Para quantificar a extração de água no solo pelas raízes das plantas em uma determinada profundidade, foi adotada a função de redução de Feddes et al. (1978) do modelo SWAP (Equação 11).

$$S(\Psi) = \alpha(\Psi) \times \frac{T_{pot}}{|Z_r|} \quad (11)$$

Em que:

$\alpha(-)$ = fator de redução da transpiração que representa o estresse hídrico a partir de valores limites de potencial mátrico;

T_{pot} = transpiração potencial da cultura (cm d^{-1});

Z_r = profundidade do sistema radicular (cm).

O modelo SWAP possui módulos genéricos simplificado e detalhado que simulam o crescimento da cultura adaptados a do modelo WOFOST. Para o presente trabalho foi utilizado o módulo simplificado de crescimento de cultura.

Para estimar a evapotranspiração da cultura e a variação do $\theta_{\text{substrato}}$, faz-se necessário o conhecimento dos parâmetros hidráulicos do substrato, profundidade do sistema radicular da cultura, parâmetros e variáveis de crescimento da cultura, dados meteorológicos do local (radiação solar global, temperatura, pressão atual de vapor, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação), e os valores de potenciais mátricos limitantes ao desenvolvimento da cultura. Essas informações citadas acima foram coletadas e utilizadas para a calibração do modelo SWAP com a implementação do módulo genérico de crescimento simplificado para a cultura do tomateiro.

O módulo genérico de crescimento simplificado da cultura não permite estimar a produtividade absoluta da cultura, porém, a sua implementação ao modelo SWAP permite o cálculo da evapotranspiração atual da cultura e quantificar a variação temporal do $\theta_{\text{substrato}}$.

Os dados de entrada coletados em campo necessários para o preenchimento do módulo referente ao crescimento simples e desenvolvimento da cultura foram os seguintes: índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultivo (kc) e profundidade do sistema radicular. O índice de área foliar foi calculado para os 49, 74 e 100 dias após

a germinação (DAG), sendo considerado que toda a área cultivada estava ocupada pela parte aérea da cultura (Equação 12).

$$IAF = \frac{AF}{A_{planta}} \quad (12)$$

Em que,

IAF = índice de área foliar (m^2 de folha m^{-2} de solo);

AF = área foliar (m^2);

$$A_{planta} = \frac{\pi \times D_{med}^2}{4} \quad (13)$$

Em que,

A_{planta} = área ocupada pela parte aérea da planta (m^2).

D_{med} = diâmetro médio da copa (m);

A área foliar (AF) e profundidade do sistema radicular foram obtidas a partir de análises destrutivas de três plantas, em intervalos de 25 dias.

Para a determinação da AF do tomateiro, obteve-se inicialmente equações de ajuste através da correlação entre os valores reais da área foliar (obtido pelo escaneamento das folhas utilizando o software "ImageJ") com o comprimento (C) e largura (L) da folha. Para a obtenção das equações de ajuste foi adotado a correlação entre valores reais com C e L, uma vez que estes apresentaram melhor correlação (levando em consideração o valor de R^2). As equações de ajuste foram obtidas utilizando duas plantas (para cada coleta), para as coletas realizadas aos 25 (média de 14 folhas planta⁻¹) (Equação 14) e 49 dias após o transplântio (DAT) (média de 23 folhas planta⁻¹) (Equação 15). Essas equações de ajustes foram utilizadas para estimar a área foliar das demais plantas coletadas para análise aos 103 DAT.

$$AF = 0,2117 \times C \times L + 18,440 (R^2 = 0,9135) \quad (14)$$

$$AF = 0,3120 \times C \times L - 21,677 (R^2 = 0,9306) \quad (15)$$

Em que,

AF = área foliar de uma única folha (cm^2);

C = comprimento da folha (cm);
L = largura máxima da folha (cm).

Já o diâmetro médio da copa foi obtido a partir do valor médio do comprimento (raio da copa) de todas as folhas da planta (Equação 16).

$$D_{med} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \right) \times 2 \quad (16)$$

Em que,

C = comprimento da folha (m);
n = número de folhas;

O coeficiente de cultivo (kc) foi obtido a partir da relação entre a evapotranspiração real da cultura (ETr) (Equação 17) e a evapotranspiração de referência (ETo) determinada através dos dados meteorológicos inseridos no modelo SWAP utilizando a equação de Penman-Monteith, para o período entre 11 e 118 DAT. Em relação a profundidade do sistema radicular, obteve-se um diferente valor para cada período de análise destrutiva realizado (49, 75 e 103 DAT).

$$ETr = Massa_t - Massa_{t+1} \quad (17)$$

Em que,

ETr = volume de água perdido por evapotranspiração em determinado tempo (L);

Massa_t = massa do lisímetro após a irrigação (kg);

Massa_{t+1} = massa do lisímetro antes da nova irrigação (kg).

Para a densidade do sistema radicular, adotou-se o valor máximo permitido pelo modelo SWAP, que é de 100 cm cm⁻³ de substrato. Para o crescimento da cultura, o módulo escolhido foi o de crescimento simples e foi considerado o crescimento fixo, para a cultura ocorrendo assim o desenvolvimento linear da cultura do tomateiro. Na tabela 2 é apresentado um resumo dos dados dos parâmetros de crescimento para o módulo simplificado de crescimento da cultura do tomateiro.

Tabela 2: Resumo dos parâmetros de crescimento simples da cultura ajustados para o módulo genérico do WOFOST implementado ao modelo SWAP

Parâmetros	Descrição	Valores de calibração
IDEV	Crescimento da cultura fixo.	1
LCC (dias)	Duração do período de crescimento da cultura.	129
KDIF	Coeficiente de extinção para luz visível difusa.	0.72
KDIR	Coeficiente de extinção para luz visível direta.	0.80
SWGC	Índice de área foliar	1
LAI (m ² foliar m ⁻² de solo)	Índice de área foliar (DVS: 0,78 - 1,15 - 1,55).	0,8294 - 2,0228 - 3,2941
SWCF	Coeficiente de cultivo (DVS: 0,80 - 1,00 - 1,20 - 1,40 - 1,60 - 1,80 - 2,00).	0,16 - 0,28 - 0,38 - 0,42 - 0,56 - 0,66 - 0,62
RD (cm)	Profundidade radicular (DVS: 0,78 - 1,15 - 1,55).	10 - 18 - 18
SwOxygen	Estresse de oxigênio de acordo com Feddes.	1
HLIM1 (cm)	Sem extração de água em potenciais mátrico no substrato superiores.	-1
SwDrought	Estresse hídrico de acordo com Feddes.	1
HLIM3H (cm)	Potencial mátrico no substrato abaixo do qual a redução da absorção de água começa com alta transpiração potencial.	-300
HLIM3L (cm)	Potencial mátrico no substrato abaixo do qual a redução da absorção de água começa com baixa transpiração potencial.	-400

HLIM4 (cm)	Potencial mátrico no substrato referente ao ponto de murcha permanente.	-15000
RDCTB (cm cm ⁻³)	Densidade radicular (Profundidade: 0,1 - 0,18).	100

O período de simulação inserido no modelo SWAP foi de 25 de maio a 01 de outubro de 2020. As condições de contorno de superfície foram definidas em função das condições meteorológicas, enquanto que na base do vaso foi definida a condição de contorno de drenagem livre. Adotou-se o teor de água referente à capacidade de campo para o início das simulações. O perfil com substrato foi discretizado em subcamadas de 1 cm de espessura. Os parâmetros hidráulicos do substrato referentes a PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação} foram utilizados para as simulações e comparado com dados observados em campo. Para a simulação do PHS_{ac} utilizou o PHS_{ac-vegetativa} para todo o ciclo da cultura. Já para a simulação do PHS_{dc} utilizou o PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação}, respectivamente, para os estádios fenológicos vegetativo, floração e frutificação, respectivamente.

Dados meteorológicos

No interior da casa de vegetação foi instalada uma estação meteorológica, composta por piranômetro, termômetro e higrômetro, para medir, respectivamente, a radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar (Figura 1A, 1B e 1C), no período entre 11 e 118 dias após o transplante (DAT) da cultura. A temperatura média no período foi de 23,8 °C. As temperaturas mínimas e máximas diárias no período, variou entre 15,99 – 22,89 °C e 25,83 – 41,50 °C, respectivamente. Já a umidade do ar média no período foi de 79,19%, tendo as mínimas e máximas diárias variando entre 32,63 – 74,76% e 90,40 – 96,20%.

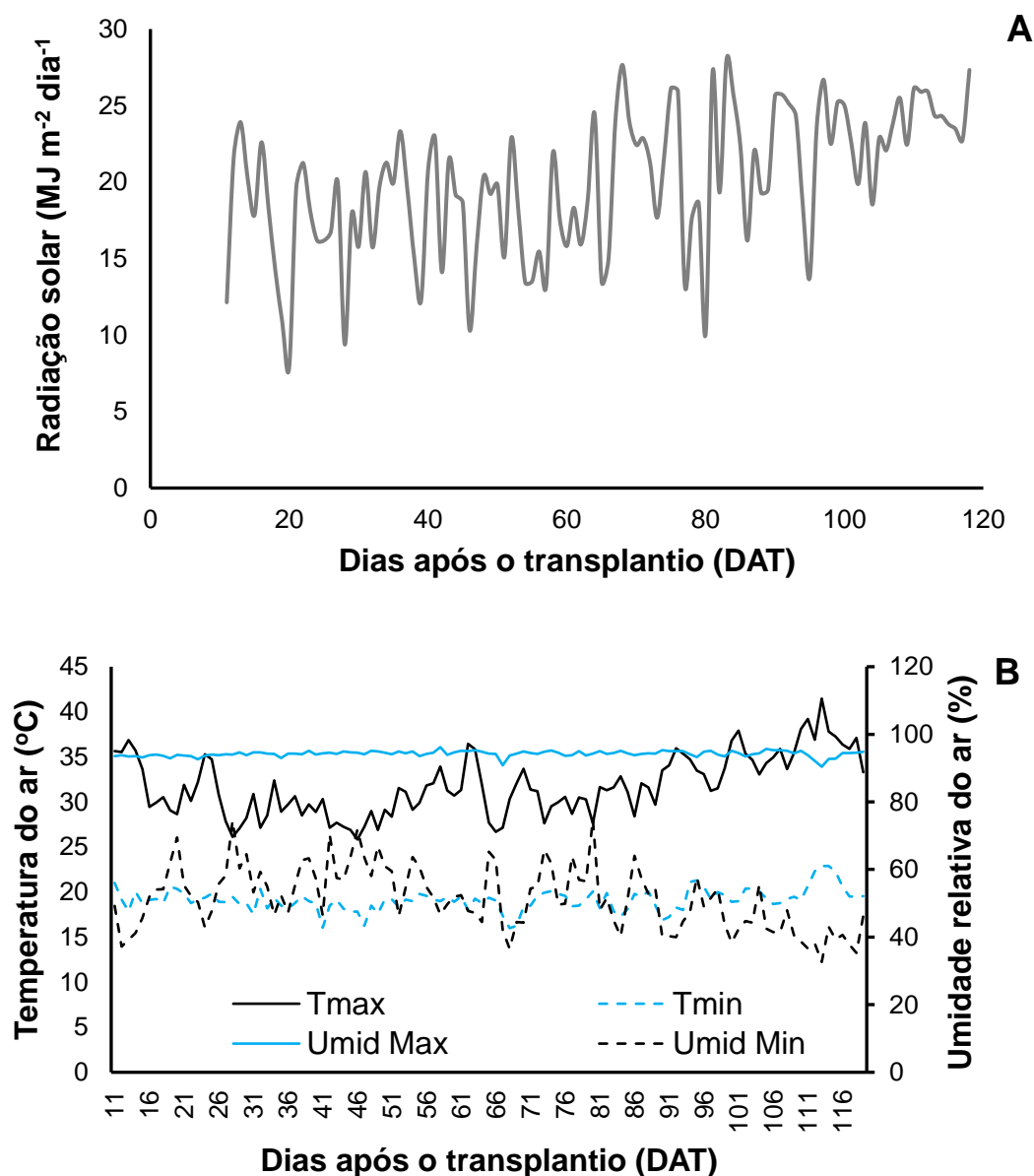


Figura 1: Radiação solar (A), temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), mínima ($T_{\text{mín}}$) do ar, umidade máxima e mínima do ar (B), no interior da casa de vegetação durante o ciclo da cultura.

Os dados horários de radiação solar (KJ m^{-2}), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e pressão de vapor d'água (kPa) (determinada conforme a metodologia de Allen et al., 1998), foram inseridos em um arquivo de entrada do modelo SWAP. Além das variáveis citadas, o arquivo com dados meteorológicos contém ainda dados de velocidade do vento e precipitação. Para a velocidade do vento, foi considerado um valor fixo de $0,5 \text{ m s}^{-1}$, seguindo a recomendação de Allen et al. (1998) para cultivo em ambientes protegidos. Em relação à precipitação, foi adicionado o valor da lâmina de irrigação

aplicada no horário em que o potencial mátrico no substrato atingiu o limite crítico estabelecido para a realização do manejo da irrigação.

Análise da performance dos dados calibrados e estimados

Para avaliar a estimativa do conteúdo de água no substrato a partir da calibração do modelo SWAP/WOFOST com a implementação do módulo genérico de crescimento simples de cultura, assim como, para analisar o efeito da mudança dos parâmetros hidráulicos do substrato sobre o cálculo da lâmina de irrigação ao longo do ciclo da cultura do tomateiro, foi utilizado os métodos estatísticos da raiz quadrada do quadrado do erro médio (RMSE = “*root mean square error*”) (Eq. 18), média dos erros absolutos (MAE = “*mean of absolute erros*”) (Eq. 19), coeficiente de determinação (R^2) (Eq. 20) e raiz quadrada do quadrado do erro médio normalizado (NRMSE = *normalized root mean square error*) (Eq. 21).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(V_O - V_E)^2}{n}} \quad (18)$$

Em que,

V_O = valor da variável observada;

V_E = valor da variável estimada pelo modelo;

n = número de observações (plantas) (adimensional).

$$MAE = \frac{\sum|V_O - V_E|}{n} \quad (19)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_O - V_{Om})(V_E - V_{Em})}{\sum_{i=1}^n (V_O - V_{Om}) \sum_{i=1}^n (V_E - V_{Em})} \right]^2 \quad (20)$$

Em que,

V_{Em} = valor médio da variável estimada.

V_{Om} = valor médio da variável observada.

$$NRMSE = \frac{100}{V_{Om}} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (V_O - V_E)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (21)$$

Para este estudo, a variável observada e estimada pelo modelo é o teor de água do substrato durante o ciclo do tomateiro. Para a análise de desempenho de dados simulados, o conteúdo de água no solo/substrato é um bom indicador para avaliar a precisão de simulação dos dados em relação ao transporte de água e evapotranspiração da cultura (De Wit et al., 2020).

Resultados e discussão

Calibração do modelo

Na Figura 1 abaixo são apresentados os dados observados da variação temporal do conteúdo de água no substrato ($\theta_{\text{substrato}}$) medidos a partir do sensor de TDR e dos valores de $\theta_{\text{substrato}}$ estimados pelo modelo SWAP para PHS_{ac} e PHS_{dc}.

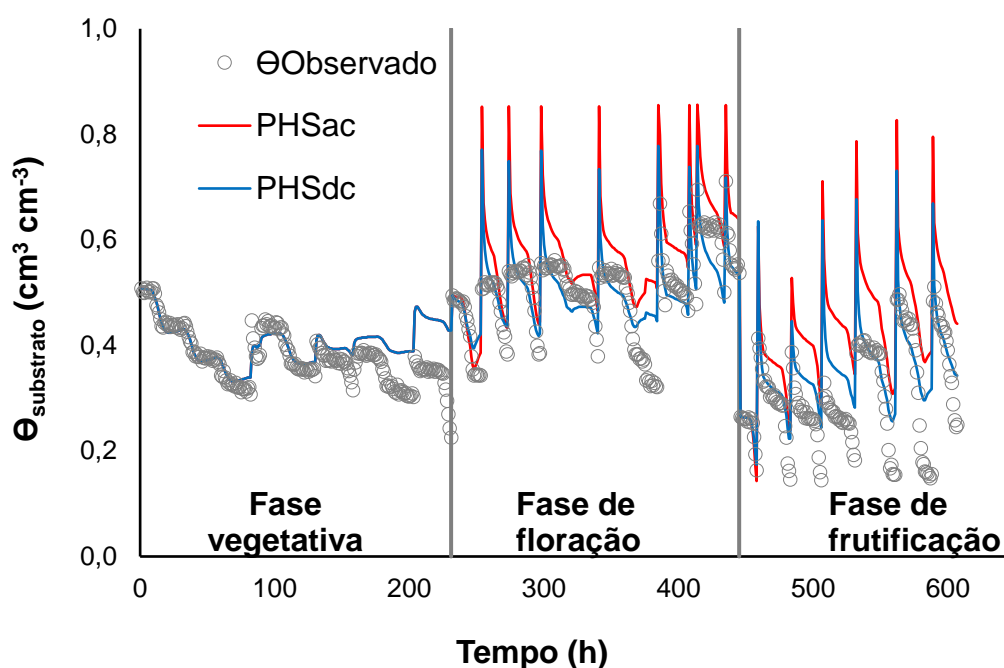


Figura 1: Variação temporal do conteúdo de água no substrato observado ($\theta_{\text{Observado}}$) pelo sensor de TDR e simulado pelo SWAP (θ_{simulado}) para a condição que utiliza os parâmetros hidráulicos do substrato antes do cultivo (PHS_{ac}) fixado para todo o ciclo da cultura utilizando o PHS_{ac-vegetativa} e para a condição que utiliza os parâmetros hidráulicos do substrato durante o cultivo (PHS_{dc}) (variando os PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação}, para as fases vegetativa, floração e frutificação, respectivamente) para todo o ciclo da cultura.

As variações temporais de $\Theta_{\text{substrato}}$ simulado para a PHS_{ac} e PHS_{dc} encontram-se associados a RMSE de 0,0980 e 0,0611 cm³ cm⁻³, respectivamente, quando comparado aos valores observados, considerando todos os 19 ciclos de irrigações analisados. Para as fases vegetativa, floração e frutificação, obteve-se valores de RMSE de 0,0499, 0,0937 e 0,1442 cm³ cm⁻³ para o PHS_{ac} e de 0,0499, 0,0571 e 0,0782 cm³ cm⁻³ para o PHS_{dc}, respectivamente. Quanto ao MAE, os valores foram de 0,0722 e 0,0416 cm³ cm⁻³, respectivamente, para o PHS_{ac} e PHS_{dc}, considerando todos os ciclos de irrigações analisados. Para as fases vegetativa, floração e frutificação, obteve-se MAE de 0,0337, 0,0721 e 0,1273 cm³ cm⁻³ para o PHS_{ac} e de 0,0337, 0,0395 e 0,0558 cm³ cm⁻³ para o PHS_{dc}, respectivamente.

Os resultados estatísticos de RMSE e MAE inferiores para o PHS_{dc}, quando comparados ao PHS_{ac}, tanto para os ciclos de irrigações analisados em conjunto, assim como, para cada uma das fases de desenvolvimento analisadas separadamente, evidenciam que as PHS se alteraram ao longo do ciclo da cultura do tomateiro e que a sua determinação proporcionou redução do erro em relação aos dados de $\Theta_{\text{substrato}}$ observados.

Para o NRMSE obteve-se os valores de 24 e 15%, respectivamente, para os PHS_{ac} e PHS_{dc}. Esses valores indicam que o PHS_{ac} teve precisão média/marginal, enquanto o PHS_{dc} apresentou boa precisão entre os valores de $\Theta_{\text{substrato}}$ estimados e observados (Stockle et al., 2004).

Efeitos do desenvolvimento do sistema radicular sobre as propriedades físicas e hidráulicas do substrato

Ao longo do ciclo da cultura do tomateiro, observou-se aumento da densidade de raízes no vaso de cultivo, obtendo valores de 4,26, 8,71 e 9,50 g dm⁻³, para os 49, 75 e 103 DAT. Além disso, com o aumento da densidade de raízes, houve um incremento no valor calculado da disponibilidade total de água (DTA) no substrato, cujos valores foram de 4,99, 5,60 e 6,28 mm cm⁻¹, respectivamente, para os PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação} (Figura 2). O aumento da DTA deve-se a variação do $\Theta_{\text{substrato}}$ referente a capacidade de campo, os quais se elevaram ao longo do ciclo do tomate: 0,558, 0,561 e 0,652 cm³ cm⁻³, para os PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação}, respectivamente. Adicionalmente, percebeu-se variação do $\Theta_{\text{substrato}}$ referente ao ponto de murcha permanente (sendo os valores de 0,059, 0,001 e 0,024

$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, para os PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação}, respectivamente, ao longo do ciclo da cultura.

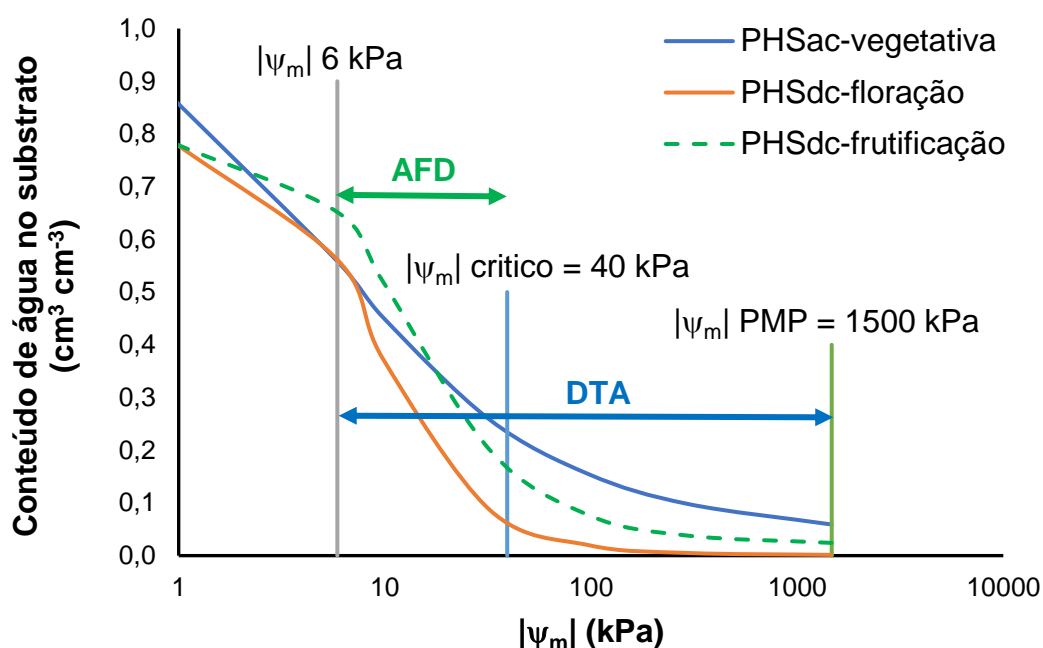


Figura 2: Curvas de retenção de água no substrato, para os parâmetros hidráulicos determinados antes do plantio (PHS_{ac-vegetativa}), para a fase de floração (PHS_{dc-floração}) e fase de frutificação (PHS_{dc-frutificação}), demonstrando as faixas de água facilmente disponível (AFD) e disponibilidade total de água (DTA).

Para a água facilmente disponível (AFD) para a cultura do tomateiro, as PHS obtidas durante o ciclo de desenvolvimento da cultura proporcionaram valores de 3,23, 4,95 e 4,84 mm cm^{-1} , respectivamente. Os valores de AFD em relação a DTA determinaram os fatores de depleção de água no substrato (fração de água que pode ser retirada do substrato sem causar déficit hídrico ao tomateiro) de 0,65, 0,88 e 0,77, respectivamente, para PHS_{ac-vegetativa}, PHS_{dc-floração} e PHS_{dc-frutificação}.

A variação nos valores da AFD e da DTA no substrato ao longo do ciclo da cultura, demonstra que o desenvolvimento do sistema radicular proporciona o aumento da retenção de água no meio de cultivo, conforme reportado nos trabalhos realizado por Michel e Kerloch (2017), Cannavo e Michel (2013); Cannavo et al., (2011). Isso devido ao fato de que a mucilagem/pelos radiculares/zona da rizosfera possuem maior capacidade de retenção de água do que o substrato (Carminati et al., 2010). Com o desenvolvimento da planta houve aumento da capacidade de retenção

de água no substrato, afetando positivamente a AFD e DTA. Na prática esta alteração implica em diminuição da frequência de irrigação, pois existe mais água armazenada/disponível. Esta verificação contribui com o aumento da precisão do cálculo da lâmina de irrigação necessária na execução do manejo da irrigação.

Além disso, o aumento da AFD e da DTA pode ser explicado devido ao aumento da microporosidade ao longo do ciclo da cultura, que foi de 55,80, 56,10 e 65,20%, respectivamente, para os $PHS_{ac-vegetativa}$, $PHS_{dc-floração}$ e $PHS_{dc-frutificação}$. Com o aumento da microporosidade do substrato, a macroporosidade diminuiu, sendo calculados valores de 30,28, 22,22 e 13,09%, para os $PHS_{ac-vegetativa}$, $PHS_{dc-floração}$ e $PHS_{dc-frutificação}$, respectivamente, efeito similar foi observado por Cannavo et al. (2011). As faixas recomendadas de macroporosidade em trabalhos científicos estão entre 20 e 30% (De Boodt e Verdonck, 1972) e entre 10 e 20% (Bugbee e Frink, 1986).

A redução da macroporosidade pode ser explicada pelo crescimento de raízes dentro da porosidade de maior diâmetro (macroporos), conforme relatado por Michel e Kerloch (2017) em um trabalho investigativo em relação aos efeitos do desenvolvimento radicular e de estratégias de irrigação sobre diferentes tipos de substratos. Sendo assim, observa-se que a PT do substrato foi reduzida ao longo do ciclo da cultura, conforme o aumento do sistema radicular no vaso de cultivo, variando de 86,08% no início do plantio para 78,29% no estágio de desenvolvimento de frutificação da cultura, ficando na faixa recomendada por Pardossi et al. (2011), que é entre 50 e 85%.

Efeito da variação das propriedades hidráulicas do substrato durante o ciclo de cultivo nas simulações agro-hidrológica

Utilizando-se dos valores críticos de $\Theta_{substrato}$ (valor do conteúdo de água no substrato utilizado para o cálculo da lâmina de irrigação) observados e estimados no SWAP para a PHS_{ac} e PHS_{dc} , calculou-se o volume de água necessário a ser aplicado para retornar o potencial de água no substrato ao limite superior de -6 kPa. Ao comparar as lâminas de irrigação simuladas com as lâminas observadas, observou-se que as lâminas de irrigação simuladas para o conjunto PHS_{dc} apresentaram melhor correlação (Figuras 2A e 2B).

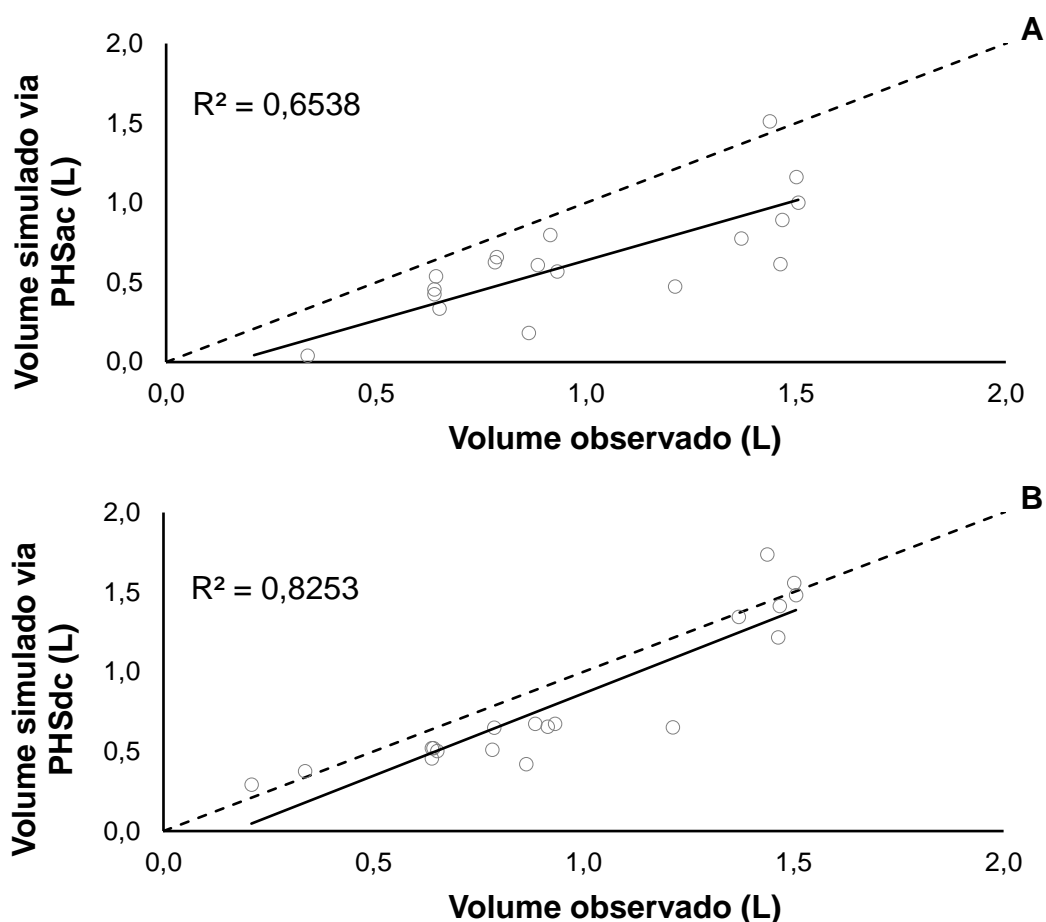


Figura 2: Correlação entre o volume de água necessário observado e simulado para retornar o potencial mátrico crítico do substrato ao valor de -6 kPa. Simulação com PHS_{ac} (A) e PHS_{dc} (B).

O cálculo do volume de água necessário para retornar o potencial mátrico do substrato para -6 kPa com base nas PHS_{dc}, proporcionou menores erros, quando comparado aos valores críticos observados. Os valores de RMSE para os 19 ciclos de irrigações utilizados nas simulações com as PHS_{ac} e PHS_{dc} foram de 0,4250 e 0,2336 L. Já os valores de MAE foram de 0,3595 e 0,1868 L, respectivamente, para a PHS_{ac} e PHS_{dc}. Quando analisado o NRMSE, este ficou em 44,27% para a PHS_{ac}, indicando baixa precisão, enquanto que para PHS_{dc} o NRMSE foi de 24,33% indicando precisão média/marginal da simulação (Stockle et al., 2004).

Ao final dos 19 ciclos de irrigações analisados, o volume de água aplicado proporcionou erro acumulado absoluto de 6,83 L para a PHS_{ac}, sendo superior ao erro acumulado absoluto de 3,55 L para a PHS_{dc}, ambos comparado ao volume de água aplicado com base nos dados críticos observados do $\Theta_{\text{substrato}}$. Em relação ao volume acumulado aplicado por vaso ao final dos 19 ciclos de irrigações, obteve-se 18,24,

11,56 e 15,64 L, respectivamente, para as condições de dados observados, PHS_{ac} e PHS_{dc}. Sendo assim, a PHS_{ac} e PHS_{dc} subestimaram o volume de água necessário, proporcionando reduções da ordem de 36,64 e 14,25% em relação ao volume acumulado aplicado (Figura 3).

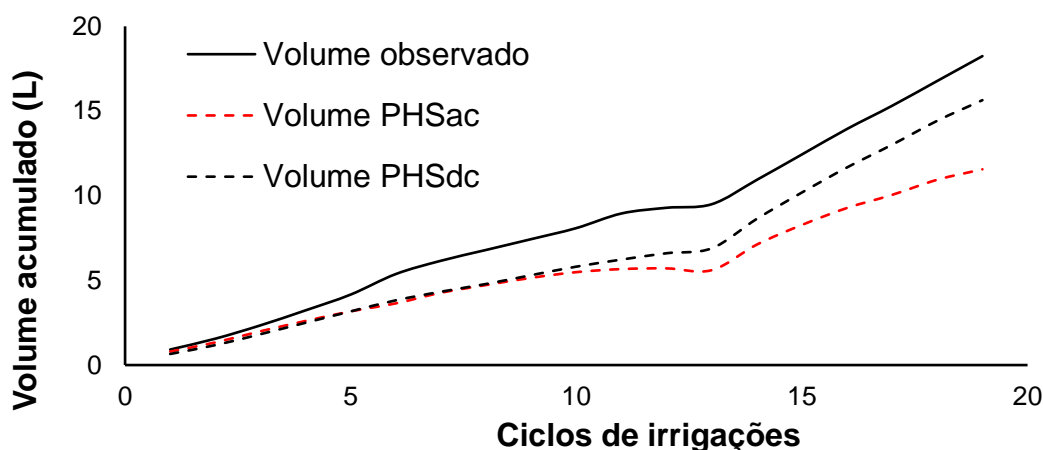


Figura 3: Volumes acumulados de água observado durante o experimento e simulado pelo modelo SWAP utilizando os conjuntos PHS_{ac} e PHS_{dc}.

Conclusões

O desenvolvimento do sistema radicular do tomateiro cultivado em vaso proporcionou alterações nas propriedades hidráulicas do substrato (PHS) ao longo do ciclo da cultura, alterando positivamente a disponibilidade total de água (DTA) e a fração de água facilmente disponível (AFD) do substrato.

A determinação das propriedades hidráulicas do substrato durante o cultivo (PHS_{dc}) do tomateiro permitiu maior precisão no cálculo da lâmina de irrigação, subestimando a lâmina real em apenas 14,3% quando comparado ao método convencional PHS_{ac} que subestimou a lâmina real em 36,6%, evidenciando que a frequência de irrigação pode ser reduzida mantendo a faixa de potencial matricial de cultivo variando entre -6 e -40 kPa, pois o aumento da densidade de raízes no vaso de cultivo contribui para a elevação da capacidade de armazenamento de água no substrato.

As mudanças das PHS_{dc} da cultura não comprometeram a faixa recomendada de microporosidade, porosidade de aeração e porosidade total para cultivo em vasos.

Referências

Al Naddaf, O., Livieratos, I., Stamatakis, A., Tsirogiannis, I., Gizas, G., Savvas, D. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite, and mixtures of them, and their impact on cucumber grown on bags. *Scientia horticultrae*, v. 129, n. 1, p. 135-141, 2011.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, D. Crop evapotranspiration: guides for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper,56.

Andriolo, J. L.; Duarte, T. D. S.; Ludke, L.; Skrebsky, E. C. Crescimento e desenvolvimento do tomateiro cultivado em substrato com reutilização da solução nutritiva drenada. *Horticultura Brasileira*, v. 21, p. 485-489, 2003.

Bai, T., Zhang, N., Wang, T., Wang, D., Yu, C., Meng, W., Zhou, B. Simulating on the effects of irrigation on jujube tree growth, evapotranspiration and water use based on crop growth model. *Agricultural Water Management*, v. 243, p. 106517, 2021.

Bateman, A. M., Erickson, T. E., Merritt, D. J., Veneklaas, E. J., Muñoz-Rojas, M. Water availability drives the effectiveness of inorganic amendments to increase plant growth and substrate quality. *Catena*, v. 182, p. 104116, 2019.

Boogaard, H.L., Wit, A.J.W.d., Roller, J., te Diepen, C.A.V., 2014. User's guide for the WOFOST Control Centre 2.1 and WOFOST 7.1.7 crop growth simulation model. Alterra. Wageningen University & Research Centre, Wageningen, pp. 133.

Bugbee, G. J.; Frink, C. R. Aeration of potting media and plant growth. *Soil science*, v. 141, n. 6, p. 438-441, 1986.

Carminati, A., Moradi, A. B., Vetterlein, D., Vontobel, P., Lehmann, E., Weller, U., Oswald, S. E. Dynamics of soil water content in the rhizosphere. *Plant and soil*, v. 332, p. 163-176, 2010.

Cannavo, Patrice; Michel, J.C. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia horticultrae*, v. 151, p. 11-21, 2013.

Cannavo, P., Hafdhi, H., Michel, J. C. Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. *HortScience*, v. 46, n. 10, p. 1394-1399, 2011.

Chemetova, C., Quilhó, T., Braga, S., Fabião, A., Gominho, J., Ribeiro, H. (2019). Aged *Acacia melanoxylon* bark as an organic peat replacement in container media. *Journal of Cleaner Production*, v. 232, p. 1103-1111, 2019.

Chen, J., Kang, S., Du, T., Qiu, R., Guo, P., Chen, R. Quantitative response of greenhouse tomato yield and quality to water deficit at different growth stages. *Agricultural water management*, v. 129, p. 152-162, 2013.

Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Xiang, Y., Liu, X., Liao, Z., Li, Z. Evaluation of AquaCrop model for greenhouse cherry tomato with plastic film mulch under various water and nitrogen supplies. *Agricultural Water Management*, v. 274, p. 107949, 2022.

Costa, W. A., Oliveira, C. A. D. S., Kato, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo-Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 515-523, 2008.

De Boodt, M. A. V. O., Verdonck, O. The physical properties of the substrates in horticulture. In: III Symposium on Peat in Horticulture 26. 1971. p. 37-44.

De Jong van Lier, Q., Pinheiro, E.A.R., Inforsato, L., 2019. Hydrostatic Equilibrium between Soil Samples and Pressure Plates Used in Soil Water Retention Determination: Consequences of a Questionable Assumption. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 43, e0190014. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20190014>

De Wit, A. J. W., Boogaard, H. L., Supit, I., Van Den Berg, M. System description of the WOFOST 7.2, cropping systems model. Wageningen Environmental Research, 2020.

Droogers, Peter, Immerzeel, W. W., Lorite, I. J. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agricultural Water Management*, v. 97, n. 9, p. 1351-1359, 2010.

Farhain, M. M., Cheema, M., Katanda, Y., Nadeem, M., Javed, B., Thomas, R., Galagedara, L. Potential of developing podzolic soil-based potting media from wood ash, paper sludge and biochar. *Journal of Environmental Management*, v. 301, p. 113811, 2022.

Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. Simulation of field water use and crop yield. In: *Simulation Monographs*. PUDOC, Wageningen, pp. 189.

Hooshmand, M., Albaji, M., Nasab, S. B., Zadeh Ansari, N. A. The effect of deficit irrigation on yield and yield components of greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum*) in hydroponic culture in Ahvaz region, Iran. *Scientia Horticulturae*, v. 254, p. 84-90, 2019.

Jiang, J., Feng, S., Ma, J., Huo, Z., Zhang, C. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model. *Field Crops Research*, v. 196, p. 85-97, 2016.

Jiang, J., Feng, S., Huo, Z., Zhao, Z., Jia, B. Application of the SWAP model to simulate water-salt transport under deficit irrigation with saline water. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 54, n. 3-4, p. 902-911, 2011.

Kroes, J.G., van Dam, J.C., Bartholomeus, R.P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R.F.A., Mulder, H.M., Supit, I., van Walsum, P.E.V., 2017. SWAP Version 4: Theory Description and User Manual. Wageningen Environmental Research, Wageningen.

Li, P., Ren, L. Evaluating the effects of limited irrigation on crop water productivity and reducing deep groundwater exploitation in the North China Plain using an agro-hydrological model: I. Parameter sensitivity analysis, calibration and model validation. *Journal of hydrology*, v. 574, p. 497-516, 2019.

Martinez H, E. P. *Manual prático de hidroponia*. 3. ed. Minas Gerais: Aprenda fácil, 2017.

Michel, J. C., Kerloch, E. Evolution of hydraulic properties and wettability of organic growing media during cultivation according to irrigation strategies. *Scientia Horticulturae*, v. 217, p. 28-35, 2017.

Mualem, Yechezkel. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

Nick, C., Silva, D., Borém, A. *Tomate do Plantio à Colheita*. 1. ed. Minas Gerais: Editora UFV, 2018.

Pardossi, A., Carmassi, G., Diara, C., Incrocci, L., Maggini, R., Massa, D. 2011. *Fertigation and Substrate Management in Closed Soilless Culture*. EUPHOROS Report (UNIFI).

Peng, Z., Smith, C., Stovin, V. The importance of unsaturated hydraulic conductivity measurements for green roof detention modelling. *Journal of Hydrology*, v. 590, p. 125273, 2020.

Richards, D., Lane, M., Beardsell, D. V. The influence of particle-size distribution in pinebark: sand: brown coal potting mixes on water supply, aeration and plant growth. *Scientia Horticulturae*, v. 29, n. 1-2, p. 1-14, 1986.

Richards, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

Sasidharan, S., Bradford, S. A., Šimůnek, J., Kraemer, S. R. Drywell infiltration and hydraulic properties in heterogeneous soil profiles. *Journal of hydrology*, v. 570, p. 598-611, 2019.

Schindler, U., Müller, L., Eulenstein, F. Hydraulic performance of horticultural substrates-1. Method for measuring the hydraulic quality indicators. *Horticulturae*, v. 3, n. 1, p. 5, 2017.

Silva, A. J. P., Pinheiro, E. A. R., Van Lier, Q. J. Determination of soil hydraulic properties and its implications for mechanistic simulations and irrigation management. *Irrigation Science*, v. 38, n. 3, p. 223-234, 2020.

Simunek, J., Sejna, M., Saito, H., Sakai, M., Van Genuchten, M. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water and Solutes 3, Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA, p. 343, 2013.

Soldateli, F. J.; Batista, C. B.; Godoy, F.; Mello, A. C.; Dos Santos Soares, F.; Bergmann, M. D.; Ethur, L. Z. Crescimento e produtividade de cultivares de tomate cereja utilizando substratos de base ecológica. *Colloquium Agrariae*, v. 16, n.1, p. 1-10, 2020.

Stockle, C. O., Kjølgaard, J., Bellochi, G. Evaluation of estimated weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation science*, v. 23, p. 39-46, 2004.

Van Genuchten, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

Zhao, Y., Mao, X., Shukla, M. K. A modified SWAP model for soil water and heat dynamics and seed–maize growth under film mulching. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 292, p. 108127, 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o cultivo do tomateiro em vasos de cultivo preenchidos com substrato, recomenda-se que a faixa de potencial matricial do substrato seja entre -14 e -40 kPa, pois irá manter o rendimento semelhante a faixa de potencial matricial do substrato entre -6 e -40 kPa e aumentará a produtividade da água do tomate grape.

Para pesquisas experimentais futuras, é recomendável que investigue outros limites superiores de potenciais matriciais de água no substrato e outras composições de substratos agrícolas, para verificar o rendimento e produtividade da água do tomateiro e as alterações das propriedades hidráulicas do substrato ao longo do ciclo da cultura.

Além disso, faz-se necessário o estudo de estratégias de determinação das propriedades hidráulicas do substrato que demande menos tempo, para que a mesma possa ser utilizada no manejo da irrigação durante o ciclo de cultivo do tomateiro.



USPAssina - Autenticação digital de documentos da USP

Registro de assinatura(s) eletrônica(s)

Este documento foi assinado de forma eletrônica pelos seguintes participantes e sua autenticidade pode ser verificada através do código ZHS6-7EPW-VJI8-UV6T no seguinte link: <https://portalservicos.usp.br/iddigital/ZHS6-7EPW-VJI8-UV6T>

Jarbas Honorio de Miranda

Nº USP: 2149858

Data: 07/12/2023 09:20