

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

**OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO
SOLO: MODELAGEM, POSIÇÃO E FREQUÊNCIA DE
USO DE SENSORES ELETRÔNICOS**

Francisco Airdesson Lima do Nascimento

CRUZ DAS ALMAS – BAHIA

2021

**OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO:
MODELAGEM, POSIÇÃO E FREQUÊNCIA DE USO DE SENSORES
ELETRÔNICOS**

Francisco Airdesson Lima do Nascimento

Tecnólogo em Irrigação e Drenagem,
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Ceará- IFCE, 2015
Mestre em engenharia Agrícola, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia-
UFRB, 2017

Tese apresentada ao Colegiado 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, Área de Concentração:
Agricultura Irrigada e Recursos
Hídricos

Orientador: Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

**CRUZ DAS ALMAS- BAHIA
2021**

FICHA CATALOGRÁFICA

N244o	<p>Nascimento, Francisco Airdesson Lima do. Obtenção de propriedades físico-hídricas do solo: modelagem, posição e frequência de uso de sensores eletrônicos / Francisco Airdesson Lima do Nascimento. Cruz das Almas, Bahia, 2021. 96f.; il.</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola. Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva.</p> <p>1.Solo – Física do solo. 2.Solo – Propriedade físico-hídrica. 3.Condutividade hidráulica – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. II.Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD: 631.4</p>
-------	---

Ficha elaborada pela Biblioteca Central de Cruz das Almas - UFRB.
Responsável pela Elaboração - Antonio Marcos Sarmento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).
(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**

**OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO:
MODELAGEM, POSIÇÃO E FREQUÊNCIA DE USO DE SENSORES
ELETRÔNICOS**

Comissão Examinadora da Defesa da Tese de
Francisco Airdesson Lima do Nascimento

Orientador - Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – IF-BAIANO

Membro interno-Prof.Dr. Lucas Melo Vellame
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia-UFRB

Membro externo- Prof.Dr. Alexandro dos Santos Brito
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – IF-BAIANO

Membro externo-Prof.Dr. Jarbas Honorio de Miranda
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-ESALQ/USP

Membro externo-Prof.Dr. Delfran Batista do Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano – IF-BAIANO

Dedico

Dedico este trabalho especialmente a minha esposa Ana Claudia Rodrigues Nascimento, que esteve sempre presente e me apoiando, dedicando esforços e sendo além de minha amada, a luz quando os meus pensamentos foram nebulosos.

Ofereço

Ao meu pai Francisco Ferreira do Nascimento e minha mãe Maria de Jesus Lima do Nascimento, por terem me concedido o dom da vida e por batalharem para eu me tornar o que sou hoje.

Aos meus sogros: Antônio Rodrigues da Silva e Francisca Gabriel da Silva. Eles me acolheram como filho, torceram e se dedicaram para concretização de toda a minha vida acadêmica, profissional e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a existência e possibilitar que a fé seja o refúgio das horas difíceis e o louvor nas horas alegres.

A Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realizar mais essa etapa acadêmica.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Capes, pela concessão de bolsa durante o período desta etapa acadêmica.

Ao Fundo de Amparo à Pesquisa da Bahia (FAPESB), pelo auxílio financeiro, sem o qual não seria possível a concretização da tese.

A todos os professores pertencentes ao corpo docente do Núcleo de Engenharia de água e solo (NEAS), pelos ensinamentos dedicados em sala de aula e fora dela.

Ao professor Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva pela orientação, contribuições na minha vida profissional, pelo olhar social que me inspirou a usar o que aprendi em prol dos menos favorecidos, pela amizade construída durante a etapa acadêmica de mestrado e doutorado e por todo o incentivo para concretização desse trabalho.

Ao professor Lucas Melo Vellame, pelo olhar crítico e bem-humorado sobre a ciência, bem como as conversas e risadas dadas nos intervalos para o café, momentos saudáveis e de descontração.

A todos que compuseram e que compõe o laboratório de instrumentação e tecnologias embarcadas, pelo convívio e aprendizado construído juntos, bem como as resenhas como se diz na Bahia.

A todos os colegas de pós-graduação e em especial aos que se tornaram meus amigos para uma vida toda: Lucio Aderito um cara de bom coração e sempre sorridente, Diego Melo que mesmo com as diferenças ideológicas e políticas, foi possível trocar conhecimentos e mudar opiniões, Fabio Tairone que mesmo tímido, conseguimos rir e construir ciência, Allan Radax paraibano brabo mas um companheiro e tanto, Neilon Duarte pelas conversas de um nível elevado, ao menos é o que pensávamos, Damiana Lima pessoa simples e solidária, Lenilson um cara esforçado, dedicado e companheiro, Peterson um exemplo de profissional e a todos os colegas da pós que pude contribuir e que contribuíram de volta.

Ao meu estagiário e amigo Ubirani, que tanto contribuiu para o sucesso do trabalho.

Ao fim quero agradecer as políticas de incentivo a ciência e educação, que por meio destas oportunizaram, a um menino de periferia no Nordeste como eu e muitos outros, o acesso à educação superior e a cursos de pós-graduação a nível de mestrado e doutorado.

EPÍGRAFE

Eu sou de uma terra que o povo padece
Mas não esmorece e procura vencer.
Da terra querida, que a linda cabocla
De riso na boca zomba no sofrer
Não nego meu sangue, não nego meu nome
Olho para a fome, pergunto o que há?
Eu sou brasileiro, filho do Nordeste,
Sou cabra da Peste, sou do Ceará.

Patativa do Assaré

OBTENÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICO-HÍDRICAS DO SOLO: MODELAGEM, POSIÇÃO E FREQUÊNCIA DE USO DE SENSORES ELETRÔNICOS

RESUMO: A realização de um correto manejo da irrigação, das simulações agro-hidrológicas e do balanço de água no solo dependem da forma de obtenção de conteúdo de água no solo. Os tipos de sensores, o local, a quantidade a serem instalados e a frequência de obtenção do conteúdo de água no solo, são exemplos de dúvidas que ainda persistem na realização do manejo de irrigação e do balanço de água no solo. Por isso, a tese aqui volta o olhar para contribuição na resolução destes problemas, e tem como objetivo verificar se diferentes procedimentos de obtenção das propriedades hidráulicas do solo, o posicionamento e quantitativo de sensores de água no solo afetam o manejo da irrigação, a modelagem agro-hidrológica e as estimativas do balanço de água no solo em cultivo irrigado por gotejamento. O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS), da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) em Cruz das Almas-Ba, localizada nas coordenadas geográficas (Latitude: 12° 39' 11" Sul, Longitude: 39° 7' 19" Oeste). O interior da casa de vegetação contou com 36 caixas de fibra de vidro com área de 1,21 m² (0,9 m de profundidade; 1,1 m de largura e 1,1m de comprimento) que foram utilizadas para cultivo, com 1 lisímetro equipado com 32 sensores de TDR e uma plataforma de pesagem. Para determinação dos parâmetros hidráulicos do solo por modelagem inversa, foi montado um ensaio de evaporação com base nos transiente hidráulico. O conteúdo de água no solo foi monitorado de duas formas: (i) utilizando sensores de TDR (ii) sensores capacitivos GS1 Para cada forma de monitoramento da umidade do solo, os sensores foram distribuídos nas profundidades de 0,05, 0,15, 0,25, 0,35 e 0,45 m. Na determinação do balanço de água no solo os sensores devem ser instalados preferencialmente na zona do bulbo molhado próximos ao gotejador. O estudo revela que, quando os sensores podem ser distribuídos em 2D / 3D, o sistema de irrigação ou seção pode ser acionado usando o sinal de um único sensor que representa a extração média de todo o perfil monitorado. O tipo de sensor e a frequência de coleta dos dados do conteúdo de água no solo interferiram nos resultados das propriedades hidráulicas do solo obtidas por modelagem inversa com implicações na modelagem agro-hidrológica e no manejo da irrigação via sensoriamento da água no solo.

Palavras chave: manejo da irrigação, modelagem agro-hidrológica, posicionamento de sensores no solo.

OBTAINING PHYSICAL AND HYDRIC SOIL PROPERTIES: MODELING, POSITION AND FREQUENCY OF USE OF ELECTRONIC SENSORS

ABSTRACT: Proper irrigation management, agro-hydrological simulations and soil water balance depend on how the soil water content is obtained. The types of sensors, the location, the quantity to be installed and the frequency of obtaining the water content in the soil are examples of doubts that still persist in carrying out irrigation management and the soil water balance. Therefore, the thesis here focuses on contributing to the resolution of these problems and aims to verify whether different procedures for obtaining soil hydraulic properties, the positioning and quantity of soil water sensors affect irrigation management, modeling agro-hydrologic and soil water balance estimates in drip-irrigated cultivation. The experiment was conducted in a greenhouse on the premises of the Water and Soil Engineering Center, at the Federal University of Recôncavo da Bahia in Cruz das Almas-Ba, located in the geographic coordinates (Latitude: 12° 39' 11" South, Longitude: 39° 7' 19" West). The interior of the greenhouse had 36 fiberglass boxes with an area of 1.21 m² (0.9 m deep; 1.1 m wide and 1.1 m long) that were used for cultivation, with 1 lysimeter equipped with 32 TDR sensors and a weighing platform. To determine the hydraulic parameters of the soil by inverse modeling, an evaporation test was set up based on the hydraulic transients. Soil water content was monitored in two ways: (i) using TDR sensors (ii) GS1 capacitive sensors. For each way of monitoring soil moisture, the sensors were distributed at depths of 0.05, 0.15, 0.25, 0.35 and 0.45 m. In determining the soil water balance, the sensors should preferably be installed in the wet bulb zone close to the dripper. The study reveals that when sensors can be distributed in 2D/3D, the irrigation system or section can be triggered using a single sensor signal that represents the average extraction of the entire monitored profile. The type of sensor and the frequency of data collection of soil water content interfered in the results of soil hydraulic properties obtained by inverse modeling with implications for agro-hydrological modeling and irrigation management via soil water sensing.

KEY WORDS: irrigation management, agro-hydrological modeling, positioning of sensors in the soil.

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO GERAL-----	15
2-OBJETIVOS ESPECÍFICOS-----	18
3-HIPÓTESE-----	18
4- REVISÃO DE LITERATURA-----	19
5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	26
CAPÍTULO 1-	
POSICIONAMENTO DE SENSORES EM PADRÕES DE MOLHAMENTO 2D/3D DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO-----	34
CAPÍTULO 2-	
SENSORES E FREQUÊNCIAS DE OBTENÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: IMPLICAÇÕES NA SIMULAÇÃO AGRO-HIDROLÓGICA E MANEJO DA IRRIGAÇÃO-----	64
CONSIDERAÇÕES FINAIS-----	98

1-INTRODUÇÃO GERAL

Nos procedimentos de análises de processos e propriedades hidráulicas do solo, uma variável de grande importância é o conteúdo de água no solo. O conteúdo de água no solo é especialmente útil para o manejo da irrigação, aplicação de modelos para simulações do movimento de água no solo e estimativas da evapotranspiração das culturas (ETc) por meio do balanço de água no solo.

O conteúdo de água no solo pode ser entendido como sendo a razão entre a massa de água e a massa do solo (Umidade a base de massa ou gravimétrica - U) ou o volume de água pelo volume de solo (Umidade volumétrica - θ). Essa grandeza, pode ser determinada em campo, e o método considerado como padrão para sua determinação é o gravimétrico, também chamado de método direto.

Mas não é só por gravimetria que se pode obter os valores de conteúdo de água no solo, pode-se também utilizar sensores, pois, a quantidade de água no solo promove variações de grandezas eletromagnéticas tais como variações na capacitância de instrumentos (sensores capacitivos), constante dielétrica aparente (sensores de TDR e FDR), ou interações físicas como atenuação de nêutrons rápidos (sonda de moderação de nêutrons) e potencial mátrico de água no solo (tensiômetros). Ao se relacionar a quantidade de água com a variação dessas grandezas, se obtém os valores do conteúdo de água no solo de maneira indireta

No mercado existem diversos sensores capazes de obter os valores do conteúdo de água no solo, com faixas de operação particulares e custos variados. Embora os princípios de fabricação e a calibração dos sensores de água no solo tenham evoluídos com incorporação de mais tecnologias, ainda não existe um critério generalista quanto a definição do posicionamento e número ótimo de sensores a serem utilizados no manejo de irrigação e no balanço de água no solo.

Trabalhos que ilustram a distribuição de extração de água no solo em duas dimensões (SILVA et al., 2009; COELHO et al., 2010; SILVA et al., 2012) revelam

a ocorrência de variabilidade da extração de água no espaço do solo ocupado pelas raízes.

A quantidade de sensores a ser utilizada em um perfil de monitoramento do conteúdo de água no solo depende das características do solo, da planta e do método de irrigação, sendo inexistente um método ou modelo que inclua todas as variáveis. Dentro dessa temática, pesquisas indicam a técnica de estabilidade temporal para indicar posicionamento ótimo de sensores (ELMALOGLOU et al., 2013; SOULIS & ELMALOGLOU, 2016). Entretanto, Silva et al. (2019) alertam que a redistribuição da água de irrigação no solo promove incertezas no uso da técnica da estabilidade temporal, sendo esses erros em relação as lâminas de irrigação e determinação do balanço de água no solo.

Um outro aspecto que deve ser observado para um correto manejo de irrigação e balanço de água no solo é a determinação das propriedades hidráulicas do solo, tais como: condutividade hidráulica saturada do solo (K_s); curva de retenção de água no solo (CRAS); condutividade hidráulica não saturada do solo (K_θ). Essas determinações integradas ao posicionamento dos sensores tornam-se um ponto chave para um correto manejo de irrigação via solo, determinações mais precisas do balanço de água no solo e aplicação da modelagem agro-hidrológica em modelos como Hydrus ou SWAP.

Tradicionalmente a forma de se determinar esses parâmetros é o método laboratorial que tem como princípio a estabilização de uma amostra de solo indeformada sob uma superfície porosa, a uma certa tensão. Nos laboratórios de física do solo, vários equipamentos como caixa de areia, mesas de tensão e câmaras de pressão são utilizados para determinar a relação entre o conteúdo de água na amostra e a tensão aplicada.

Os métodos laboratoriais, apesar de sua aceitação apresentam uma dificuldade relacionada a custo de implantação, dificuldade ao acesso em algumas regiões do país e ao próprio equilíbrio: qual é o tempo e critério suficiente para saber se houve realmente o equilíbrio. Uma alternativa é o método de condições transientes que envolvem a modelagem inversa (MI) para análise das variações do conteúdo de água no solo e de evaporação que ocorrem no solo para determinação de propriedades hidráulicas do solo. Esse

método ganhou uma aplicação computacional no pacote Hydrus e vem sendo muito difundida.

A comparação entre os métodos laboratoriais e a modelagem inversa deu origem a diversos trabalhos que apontam distinções nas propriedades hidráulicas obtidas em um mesmo solo pelos dois métodos (RITTER et al., 2003; DEXTER et al., 2012; PETERS et al., 2015; LI et al., 2017). Tais diferenças são associadas, dentre outros fatores, ao fato de que o método laboratorial não fornece valores precisos nas curvas de retenção em potenciais mais negativos, devido à falta da estabilidade entre a amostra de solo e a placa porosas (CRESSRELL et al., 2008; BITELLY & FLURI. 2009; SOLONE et al., 2012; DEXTER et al.2012; VAN LIER et al., 2019).

Silva et al. (2020) relatam que as diferenças nas propriedades hidráulicas obtidas por MI e pelo método laboratorial, podem interferir nos valores de lâmina de irrigação e nas simulações de ET_c obtidas pelo SWAP.

A realização de um correto manejo da irrigação, das simulações agro-hidrológicas e do balanço de água no solo dependem da forma de obtenção de conteúdo de água no solo. Os tipos de sensores, o local, a quantidade a serem instalados e a frequência de obtenção do conteúdo de água no solo, são exemplos de dúvidas que ainda persistem na realização do manejo de irrigação e do balanço de água no solo. Essas preocupações foram aqui direcionadas para cultura do maracujazeiro, pois o Brasil é considerado o maior produtor de maracujá do mundo, com 593.429 toneladas no ano de 2019 (IBGE 2019), além da cultura ter um potencial produtivo no país, poucos são os trabalhos que abordam o manejo da irrigação da cultura. Por isso, a tese aqui volta o olhar para contribuição na resolução destes problemas, e tem como objetivo verificar se diferentes procedimentos de obtenção das propriedades hidráulicas do solo, o posicionamento e quantitativo de sensores de água no solo afetam o manejo da irrigação, a modelagem agro-hidrológica e as estimativas do balanço de água no solo em cultivo de maracujazeiro irrigado por gotejamento.

2-OBJETIVOS ESPECÍFICOS

(I) avaliar a influência do posicionamento e do número de sensores utilizados no monitoramento do conteúdo de água no solo em espaços uni, bi e tridimensional na zona radicular do maracujazeiro para determinação da evapotranspiração pelo balanço de água no solo;

(II) fornecer informações para o desenvolvimento de um critério para o posicionamento dos sensores de conteúdo de água no solo, visando o melhor desempenho do balanço de água no solo e manejo da irrigação;

(III) Analisar se o tipo de sensor e a frequência de obtenção de dados do conteúdo de água no solo utilizados na modelagem inversa afetam os resultados das propriedades hidráulicas do solo;

(IV) verificar se as variações nos protocolos de obtenção de conteúdo de água no solo afetam os resultados das propriedades hidráulicas do solo ao ponto de causar efeito na modelagem agro-hidrológicas pelo SWAP e no manejo da irrigação via solo.

3-HIPÓTESE

O procedimento adotado para determinar as propriedades hidráulicas do solo, bem como o tipo, número e posicionamento de sensores de conteúdo de água no solo, pode influenciar nos resultados das estimativas do balanço de água no solo, a modelagem agro-hidrológica e o manejo da irrigação por gotejamento.

4- REVISÃO DE LITERATURA

4.1 *Balanço de água no solo*

O balanço de água no solo envolve os processos de entrada e saída da água em um espaço definido, geralmente sendo esse ocupado por 95% do sistema radicular. Os processos de entrada são: infiltração da água pela precipitação (P) e/ou irrigação (I), e ascensão capilar Ac; enquanto os processos de saída são: drenagem interna ou percolação (D), deflúvio superficial (DS) e evapotranspiração (evaporação + transpiração) (ET). Como descrito os componentes do balanço de água no solo são compostos por entradas e saídas de água, entendendo que o solo armazena água, as variações do balanço de água no solo podem ser organizadas matematicamente em variação de armazenagem (Δh) (LIBARDI & SAAD, 1994; KOWALIK, 2006; SUBBAIAH, 2013 SILVA et al., 2015).

$$\Delta h = P + I + A_c - ET - D - D_s \quad (1)$$

O Δh pode ser conhecido medindo as variações do conteúdo de água no solo (CAS), os valores de precipitação podem ser medidas por meio de um pluviômetro, a irrigação é um volume facilmente quantificado, os valores de ascensão capilar apresentam contribuições muito pequenas para o balanço de água no solo e é comumente desconsiderada, dessa forma conhecendo os valores de deflúvio superficial e drenagem é possível determinar os valores de ET que do ponto de vista de manejo de irrigação é uma variável de grande importância para tomada de decisão.

A determinação de ET por meio do balanço de água no solo é uma técnica empregada para determinar coeficientes de cultivo (K_c), com instrumentação mais simples que um lisímetro e é muito aplicada em diversas culturas. Nesse enfoque muitos trabalhos científicos utilizaram o balanço de água no solo para conhecer a demanda hídrica das culturas (LIMA et al., 1990; LIBARDI & SAAD, 1994; PALOMO et al., 2003; EVETT et al., 2012).

Além da demanda hídrica das culturas os estudos dos componentes do balanço de água no solo podem fornecer resultados que auxiliem na tomada de decisão para redução dos impactos nos recursos hídricos, como relata Kisekka

et al. (2019), que utilizou a técnica para estimar a drenagem e com isso propor uma forma de quantificar a lixiviação de elementos químicos do solo.

O desafio encontrado na técnica é o número de sensores de água no solo para determinação dos valores de Δh , os melhores resultados são obtidos com um número grande de sensores (PALOMO et al., 2002; GUNDUZ et al., 2011).

Silva et al., (2015) mostrou que o número de sensores influencia nos valores do consumo hídrico da bananeira, em abordagem similar Nascimento et al. (2019) observou que o maior número de sensores promove um melhor conhecimento dos valores de Δh , entendendo bem as variações ao longo do crescimento do meloeiro irrigado por gotejamento em uma região semiárida.

4.2 Determinação dos parâmetros hidráulicos do solo e modelagem inversa.

A característica de armazenagem e movimento da água no solo é diretamente relacionada aos parâmetros hidráulicos do solo, e sua determinação decide a qualidade dos resultados da irrigação, processos de movimento da água no solo e aplicações de modelos para simulação agro-hidrológica.

A irrigação é influenciada pelos parâmetros hidráulicos do solo devido ao manejo via solo depender dos conceitos de capacidade de campo, ponto de murcha permanente e umidade crítica, sendo que para identificação desses conceitos é necessário a obtenção da curva de retenção de água no solo (CRAS). Essa curva descreve a relação entre a umidade volumétrica e a tensão com que a água está retida nos poros do solo $\theta(\psi)$. Já o movimento da água no solo e a modelagem agro-hidrológica tem sua base matemática na equação de Richards (1931), que leva em consideração a condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$, e a variação de umidade em relação a tensão de água no solo. Portanto antes de iniciar qualquer uma dessas atividades é necessário o conhecimento desses parâmetros.

O método tradicional de determinação a retenção de água no solo é baseado na estabilidade do equilíbrio hidro estático entre uma amostra de solo e um meio poroso a certa pressão. Nos laboratórios de física do solo, vários equipamentos como caixa de areia, mesas de tensão e câmaras de pressão são

utilizadas para determinar a relação entre o conteúdo de água no solo na amostra e a tensão aplicada (BITTELLI & FLURY, 2009).

Para se obter os pares de valores de tensão ψ e o conteúdo de água no solo (θ), deve-se adotar um modelo de curva de retenção de água no solo, sendo que o modelo mais utilizado é o de VAN GENUCHTEN (1980). Porém, a determinação dessa curva não mensura a condutividade hidráulica não saturada e, para se determinar esse parâmetro muitos estudos utilizam o modelo de Mualem, (1976), esse modelo é dependente da condutividade hidráulica saturada (K_s), que depende de amostras indeformadas coletadas em solo e estão associadas a erros de estimativas nos laboratórios. Esses métodos demandam uma logística laboratorial e apresentam um custo associado, sendo que em suas determinações são geralmente incorporados os erros de aplicação da determinação, isso pode proporcionar resultados do conteúdo de água no solo incoerentes e até mesmo simulações com grandes incertezas (VERECKEN et al., 2010; ADHANOM et al., 2012).

Uma alternativa é o método de modelagem inversa. Esse método foi preconizado por Gardner & Miklich (1962), em que os autores impuseram taxas de fluxos constantes e mediram a variação do potencial mátrico da água com dois tensiômetros, o método foi melhorado por Wind, (1968) que introduziu o método matemático de iteração gráfica, para obtenção da curva de retenção de água no solo e posteriormente os valores de K_s e $K(\theta)$. O método foi automatizado pela primeira vez por Wendroth et al. (1993).

Šimunek et al. (1998) avaliaram o potencial do método utilizando o pressuposto por Wind, (1968), Wendroth et al. (1993), utilizando como incorporando a técnica na ferramenta computacional o Hidrus 1D. A modelagem inversa pode ser aplicada em campo ou em laboratório, desde que seja possível medir a umidade por um longo tempo. Isso possibilitou o número crescente de trabalhos científicos, que utilizaram essa técnica para determinar os parâmetros hidráulicos do solo (ŠIMUNEK et al., 1998; ROMANO & SANTINI, 1999; LI et al. 2017; PINHEIRO et al., 2019; SILVA et al., 2020).

Para determinar os parâmetros hidráulicos, o método de modelagem inversa, toma como base um problema de redução de erros (ŠIMUNEK et al.,

1998), que relaciona o somatório dos erros entre o valor medido e o estimado com base na iteração de valores e o acúmulo dos erros e incrementado ao longo do tempo.

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

em que, o lado direito da equação 6 representa o resíduo entre o conteúdo de água no solo observado no tempo t_i para j th medidas em z_i , e os correspondentes valores do conteúdo de água no solo estimado (θ_{estimado}) utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados em β (i.e., θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ); m é o número de diferentes locais de medidas de Θ ; e n o número de medidas realizadas em um m .

O uso da modelagem inversa é largamente associada ao modelo hidrológico Hydrus, que possui no próprio software a solução da função objetiva do método de minimização não-linear de Levenberg-Marquardt - (ŠIMŮNEK et al., 1998; ABBASI et al., 2013). No caso do SWAP, o modelo pode ser conjugado ao um software externo, como por exemplo o PEST. Recentemente a aplicação de algoritmos de otimização como algoritmo genético começa a ser aplicado para determinação de MI, pelo fato de ser um algoritmo robusto de otimização e de fácil aplicação em linguagens de programação como o R e Python (LI et al., 2018; XING et al., 2021).

4.3- Número e posicionamento de sensores do conteúdo de água no solo e suas implicações na irrigação e modelagem agro-hidrológica.

A quantidade de sensores a ser utilizada em um perfil de monitoramento do conteúdo de água no solo depende das características do solo, da planta e do método de irrigação, sendo inexistente um método ou modelo que inclua todas as variáveis. Dentro dessa temática, recentemente, vem sendo observadas diversas implicações dos valores do conteúdo de água no solo obtidos em distintos posicionamentos de sensores, podem provocar alterações no manejo de irrigação (SILVA et al., 2019; SILVA et al., 2018; SOULIS & ELMALOGLOU., 2016; SOULIS et al., 2013; ELMALOGLOU & SOULIS., 2013).

Os posicionamentos dos sensores interferem na determinação dos componentes do balanço de água no solo, tais como variação de armazenagem

e lâmina percoladas conforme o descrito por (ELMALOGLOU & DIAMANTOPOULOS, 2008). Esses erros são associados a variabilidade de extração pelas culturas e pela arbitrariedade com que os sensores são instalados no solo (SILVA et al, 2018)

Silva et al. (2015) verificaram que devido a variabilidade da extração de água existente na região explorada pelas raízes da bananeira, instalar sensores na região de maior intensidade de extração de água superestima os valores de evapotranspiração da cultura, sendo necessário, para uma dada condição, estabelecer o número mínimo de sensores necessários a se instalar no perfil.

O posicionamento de sensores interfere na precisão do manejo de irrigação, podendo proporcionar incertezas no conteúdo de água medido, levando a subestimação ou superestimação da quantidade de água aplicada para cultura. Isso é relatado por Soulis et al. (2015), que observaram variações significativas obtidas por modelagem numérica, em relação ao local de instalação de sondas de umidade.

Recentemente vem se empregando o método de estabilidade temporal para determinação do ponto ótimo de monitoramento de umidade do solo (SOULIS & ELMALOGLOU, 2018; SOULIS & ELMALOGLOU, 2016; SOULIS et al., 2015), porém esses estudos não levam em consideração, a distribuição e redistribuição de água no solo, limitando a aplicação ao evento ao qual foi determinado. Diante dessa problemática, Silva et al. (2019), mostraram que a aplicação desta técnica em momentos de alta intensidade de redistribuição de água (momento em que o sistema de irrigação se encontra ligado), produz médias com altos desvios associados. Os autores indicam que a técnica seja aplicada nos tempos finais de um intervalo de irrigação.

O posicionamento e o número de sensores não afetam somente as determinações da irrigação, mas todo os componentes do balanço de água no solo, podendo resultar em simulações por modelos agro- hidrológicos bem distantes da realidade (LI et al., 2014; PHOGAT et al., 2018).

4.4- Movimento de água no solo: abordagem por modelagem agro-hidrológica.

A caracterização dos padrões da movimentação da água no solo é de fundamental importância para solucionar os problemas relacionados a irrigação, drenagem, conservação de água, recarga e poluição de lenções subterrâneos, bem como a infiltração (HILLEL, 2003).

Todos esses fenômenos podem ser entendidos como fluxos que ocorrem no meio não saturado, englobando solo, planta e atmosfera. E para o entendimento dos fluxos, a equação de Richards é uma roupagem matemática que auxilia a compreensão desses fenômenos.

Recorrentemente, pesquisas vem sendo feita com uso da modelagem numérica (SIMUNEK et al., 2011; JAVAUX et al., 2013; SUBBAIAH, 2013), ou por meio de medidas diretas, via sensores de umidade do solo (SILVA et al., 2013; SILVA & COELHO, 2014), visando conhecer separadamente o comportamento dos fenômenos envolvidos na dinâmica da água no solo. No caso do uso de modelos, se destacam o Hydrus 1D e Hydrus 2D/3D, podendo ser utilizados para simulações agro hidrológicas (SIMUNEK et al., 2011).

Outro modelo de larga aplicabilidade é o Soil Water Atmosphere Plant (SWAP), esse modelo se baseia na teoria de fluxos de Richards e é utilizado pelo fato de ser um modelo robusto, capaz de simular e predizer os fenômenos de transporte de massa e a relação entre planta solo e atmosfera (VAN DAM et al., 1997; SCARPARE, 2011; KROES et al., 2017).

O modelo SWAP apresenta a vantagem de ser aberto, possibilitando a implementação de culturas e de condições não nativas. O modelo ainda possibilita a simulação de cenários que pode ir da evapotranspiração a transporte de solutos, diminuindo os custos com experimentação. Isso possibilita dar suporte ao manejo de irrigação para culturas agrícolas pois é possível fazer sua calibração para situações específicas que se quer estudar (TEDESCHI & MENENTI, 2002; JIANG et al., 2016; SILVA et al., 2019).

4.5-Manejo da irrigação do maracujazeiro

O Brasil é o maior produtor de maracujá do mundo, apresentando uma produção de 593.429 toneladas em uma área colhida de 41.548 hectares, com

uma produtividade de 14,27 toneladas por hectare no ano de 2019 (IBGE 2019). Dentre as regiões produtoras da cultura, o Nordeste detém 64,5% da produção nacional, sendo a Bahia o maior produtor, com 28,40 % da produção da região (IBGE, 2019). Os dados indicam que a cultura do maracujazeiro apresenta grande potencial produtivo de rentabilidade para agricultura do país.

Embora a cultura apresente um grande potencial produtivo, as tecnologias no que diz respeito ao manejo de irrigação ainda é escassa na literatura vigente. O que se tem conhecimento é que o sistema de irrigação mais utilizada para produção dessa cultura é o de gotejamento que distribui a água próximo ao sistema radicular (SOUSA & MATSURA, 2004).

A irrigação dessa cultura é indispensável em regiões semiáridas e subúmidas, e o manejo da irrigação ainda é uma lacuna para desenvolver suas potencialidades. O manejo da irrigação do maracujazeiro ainda está pautado nas diretrizes da lâmina de irrigação e aplicações de fertilizantes via água (CARVALHO et al., 2000; SOUSA et al., 2003; ARAUJO et al., 2012). Essas lâminas ainda são determinadas tomando, como base, os dados de coeficiente de cultivo que não representam a realidade de cada pomar. Os coeficientes de cultivos são oriundos de trabalhos que não levaram em consideração o número e posicionamento de sensores, ou se quer conhecem a redistribuição da água no solo na zona radicular dentro do bulbo molhado.

O sistema de irrigação empregado na cultura do maracujazeiro é o gotejamento, logo a distribuição de água, as propriedades hidráulicas do solo são pontos chave para melhorar o refinamento do manejo da irrigação dessa cultura. Potanto, os trabalhos que apontam diretrizes de posicionamento de sensores, variações nas propriedades do hidráulicas do solo potencializam ainda mais a produção dessa cultura e podem ser considerados pioneiros.

5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI. et al. Inverse Estimation of Soil Hydraulic and Solute Transport Parameters From Transient Field Experiments: Heterogeneous Soil. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 4, p. 1097–1111, 2013.

ADHANOM, G. T., STIRZAKER, R. J., LORENTZ, S. A., ANNANDALE, J. G., STEYN, J. M. Comparison of methods for determining unsaturated hydraulic conductivity in the wet range to evaluate the sensitivity of wetting front detectors. **Water SA**, v. 38, n. 1, p. 67–76, 2012.

ARAÚJO, H. F. de et al. Produtividade e análise de indicadores técnicos do maracujazeiro-amarelo irrigado em diferentes horários. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 159-164, 2012.

BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1453, 2009.

CARVALHO, A. J. C.; MARTINS, D. P.; MONNERAT, P. H.; BERNARDO, S. Adubação nitrogenada e irrigação no maracujazeiro-amarelo. I. Produtividade e qualidade dos frutos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1101-1108, 2000.

COELHO, E. F; SILVA, A. J.P; MIRANDA, J. H. Definição do posicionamento de sensores para monitoramento da água no solo em bananeira irrigada por diferentes sistemas de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, p. 608–618, 2010.

CRESSWELL, H. P.; GREEN, T. W.; MCKENZIE, N. J. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. **Soil science society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 41-49, 2008.

DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A.; & RICHARD, G. Equilibrium, non-equilibrium and residual water: consequences for soil water retention. **Geoderma**, V. 177, P. 63-71, 2012.

ELMALOGLU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. The effect of intermittent water application by surface point sources on the soil moisture dynamics and on deep percolation under the root zone. **Computers and electronics in agriculture**, v.

62, n. 2, p. 266–275, 2008.

ELMALOGLU, S.; SOULIS, K. X.; DERCAS, N. Simulation of Soil Water Dynamics Under Surface Drip Irrigation from Equidistant Line Sources. **Water Resour Manage**, v. 27, n. 12, p. 4131–4148, 2013.

EVETT, S. R.; SCHWARTZ, R. C.; CASANOVA, J. J.; & HENG, L. K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. **Agricultural Water Management**, v. 104, p. 1-9, 2012.

GARDNER, W. R.; MIKLICH, F. J. Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. **Soil Science**, v. 93, n. 4, p. 271-274, 1962.

GUNDUZ, M., KORKMAZ, N., ASIK, S., UNAL, H. B., & AVCI, M. U. H. A. M. M. E. D. Effects of various irrigation regimes on soil water balance, yield, and fruit quality of drip-irrigated peach trees. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 7, p. 426-434, 2011.

HALBERTSMA, J. et al. Reevaluation of the Evaporation Method for Determining Hydraulic Functions in Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 1436–1443, 1993.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. Elsevier, academic Press. 2003. 294p.

INSTITUTO BRASILEIRO GEOGRAFIA ESTATISTICA (IBGE). Base de dados dos produtos. Embrapa: Mandioca e Fruticultura. 2019. Disponível em <http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_xls/brasil/maracuja/maracuja_brasil_producao.htm>. Acesso em: 27Jun. 2021.

JAVAUX, M. C. J. V.; VEREECKEN, H. Root Water Uptake: From Three-Dimensional Biophysical Processes to Macroscopic Modeling Approaches. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. Anniversary, p. 1–16, 2013.

JIANG, J. et al. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model. **Field Crops Research**, v. 196, n. 1, p. 85–97, 2016.

KISEKKA, I.; KANDELOUS, M. M.; SANDEN, B.; HOPMANS, J. W. Uncertainties in leaching assessment in micro-irrigated fields using water balance

- approach. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 107–115, 2019.
- KOWALIK, P. J. Drainage and capillary rise components in water balance of alluvial soils. **Agricultural water management**, v. 86, n. 1-2, p. 206-211, 2006.
- KROES, J. G., VAN DAM, J. C., BARTHOLOMEUS, R. P., GROENENDIJK, P., HEINEN, M., HENDRIKS, R. F. A., VAN WALSUM, P. E. V. **SWAP version 4**. Wageningen Environmental Research, 2017.
- LI, Y. B.; LIU, Y.; NIE, W. B.; MA, X. Y. Inverse modeling of soil hydraulic parameters based on a hybrid of vector-evaluated genetic algorithm and particle swarm optimization. **Water**, v. 10, n. 1, p. 84, 2018.
- LI, N.; SUN, Y.; WAN, L.; REN, L. Estimating Soil Hydraulic Parameters by Inverse Modeling with PEST. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 11, p. 0, 2017.
- LI, Y. et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. **Agricultural water management**, v. 142, p. 38-46, 2014.
- LIBARDI, P.L.; SAAD, A.M. Balanço hídrico em cultura de feijão irrigada por pivô central em Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 529-532, set./dez. 1994.
- LIMA, W. D. P.; ZAKIA, M. B.; LIBARDI, P. L.; SOUZA FILHO, A. P. Comparative evapotranspiration of Eucalyptus, Pine and natural “Cerrado” vegetation measure by the soil water balance method. **IPEF International**, v. 1, p. 5-11, 1990.
- MARSHALL, D.C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. **Plant Physiology**, v. 33, n. 6, p. 385, 1958.
- MAYER, D. G.; STUART, M. A.; SWAIN, A. J. Regression of Real-World Data on Model Output : An Appropriate Overall Test of Validity. **Agricultural Systems**, v. 45, p. 93–104, 1994.
- 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.

NASCIMENTO, F. A. L. D.; SILVA, A. J. P. D.; CAMPOS, A. R. F. Soil water storage variability in a three-dimensional analysis in the root zone of irrigated melon. **Bragantia**, v. 78, p. 587-595, 2019.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; & FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 2019.

OATES, M. J.; RAMADAN, K.; MARTÍNEZ, J. M.M.; CANALES, A. R. Automatic fault detection in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 41-48, 2017.

PALOMO, M. J.; MORENO, F.; FERNÁNDEZ, J. E.; DIAZ-ESPEJO, A.; & GIRÓN, I. F. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. **Agricultural water management**, v. 55, n. 1, p. 15-35, 2002.

PETERS, A.; IDEN, S.C.; DURNER, W. Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 531-542, 2015.

PINHEIRO, E. A. R. et al. Measuring full-range soil hydraulic properties for the prediction of crop water availability using gamma-ray attenuation and inverse modeling. **Agricultural Water Management**, v. 216, n. August 2018, p. 294–305, 2019.

PHOGAT, V. et al. Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages. **Agricultural water management**, v. 201, p. 70-82, 2018.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3585, 2020.

RICHARDS, L. A. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. **Soil Science**, v. 66, n. 2, p. 105-110, 1948.

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

RITTER, A.; HUPET, F.; CARPENA, R.M.; LAMBOT, S., VANCLOOSTER, M.

Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 2, p. 77-96, 2003.

REYNOLDS, S. G. The gravimetric method of soil moisture determination Part IA study of equipment, and methodological problems. **Journal of Hydrology**, v. 11, n. 3, p. 258-273, 1970.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation approach: Experimental verifications and numerical studies. **Water Resources Research**, v. 35, n. 11, p. 3343–3359, 1999.

SCARPARE, F. V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agro-hidrológico SWAP/WOFOST**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 164p. 2011.

SCHMUGGE, T. J.; JACKSON, T. J.; MCKIM, H. L. Survey of methods for soil moisture determination. **Water Resources Research**, v. 16, n. 6, p. 961-979, 1980

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.

SILVA, A. J. P.; DE JONG VAN LIER, Q.; COELHO, E. F. Time Stable Representative Position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, n. December 2018, p. 281–287, 2019.

SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M. . Agricultural Engineering | Research Article Water extraction and implications on soil moisture sensor placement in the root zone of banana. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 2, p. 95–101, 2018.

SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F.; COELHO FILHO, M.A. Water extraction in banana root zone affects the reliability of water balance. **Sci. agric**, v.72, n.1, p. 1-10, 2015

SILVA, A.J.P. & COELHO, E.F. Estimation of water percolation by different methods using TDR. **R. Bras. Ci. Solo**, v.38, p.1-9, 2014.

SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F.; MIRANDA, J.H. Efficiency of water application of irrigation systems based on microsprinkling in banana plantations. **Scientia Agricola**, vol.70, n.3, p. 139-146, 2013.

SILVA, A.J.P.; COELHO, E.F.; MIRANDA, J.H. Sensor placement for irrigation scheduling in banana using micro-sprinkler system. **Water Resources and Irrigation Management**. V.1, n.1, p.15-23, 2012.

SILVA, A. J. P. D.; COELHO, E. F.; MIRANDA, J. H. D.; & WORKMAN, S. R. Estimating water application efficiency for drip irrigation emitter patterns on banana. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 730-737, 2009.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M. 2013. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, California, USA, p. 343, 2013.

SIMUNEK, J.; van GENUCHTEN, M.; SEJNA, M. The HYDRUS **software package for simulating two and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media**. Tech. Manual, version 2.0, Prague, Czech Republic: PC Progress. 2011.

ŠIMŮNEK, J.; van GENUCHTEN, M. T.; WENDROTH, O. Parameter Estimation Analysis of the Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 894, 1998.

SOULIS, K. X.; ELMALOGLOU, S. Optimum soil water content sensors placement for surface drip irrigation scheduling in layered soils. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 152, n. June, p. 1–8, 2018.

SOULIS, K. X.; PH, D.; ELMALOGLOU, S. Optimum Soil Water Content Sensors Placement in Drip Irrigation Scheduling Systems: Concept of Time Stable Representative Positions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 11, p. 04016054-2, 2016.

SOULIS, K. X.; ELMALOGLOU, S.; DERKAS, N. Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 258–268, 2015.

SOUSA, V. F et al. Produtividade do maracujazeiro amarelo sob diferentes níveis de irrigação e doses de potássio via fertirrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 4, p. 497-504, 2003.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 7-15, 2004.

SOLONE, R.; BITTELLI, M.; TOMEI, F.; & MORARI, F. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. **Journal of Hydrology**, v. 470, p. 65-74, 2012.

SUBBIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. **Irrigation Science**. vol. 31, p.225-258, 2013.

TEDESCHI, A.; MENENTI, M. Simulation studies of long-term saline water use: Model validation and evaluation of schedules. **Agricultural Water Management**, v. 54, n. 2, p. 123–157, 2002.

VAN LIER, Q. D. J.; PINHEIRO, E. A. R.; & INFORSATO, L. Hydrostatic equilibrium between soil samples and pressure plates used in soil water retention determination: consequences of a questionable assumption. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VAN DAM, J.C. et al. **SWAP version 2.0, Theory. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment**. Report 71, 167p. 1997.

VERECKEN, H. et al. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten–Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. **Vadose Zone Journal**,

v. 9, n. 4, p. 795, 2010.

WENDROTH, O.; EHLERS, W.; HOPMANS, J. W.; KAGE, H.; HALBERTSMA, J., WÖSTEN, J. H. M. Reevaluation of the Evaporation Method for Determining Hydraulic Functions in Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 1436–1443, 1993.

WIND, G. P. Capillary conductivity data estimated by a simple method. **Water in the Unsaturated zone**, v. 1, p. 181–191, 1968.

XING, X.; LIU, Y.; GARG, A.; MA, X.; YANG, T.; ZHAO, L. An improved genetic algorithm for determining modified water-retention model for biochar-amended soil. **Catena**, v. 200, p. 105143, 2021.

CAPÍTULO 1

POSICIONAMENTO DE SENSORES EM PADRÕES DE MOLHAMENTO 2D/3D DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

POSICIONAMENTO DE SENSORES EM PADRÕES DE MOLHAMENTO 2D/3D DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Autor : Francisco Airdesson Lima do Nascimento

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

RESUMO: Uma dificuldade na determinação de critérios para o posicionamento de sensores é a comprovada existência de variabilidade da extração de água na zona radicular. Por outro lado, o conhecimento detalhado da variabilidade da extração da água no solo pode ser o ponto chave para definir critério de posicionamento de sensores e acabar com as decisões arbitrárias. O objetivo do trabalho foi: (I) avaliar a influência da disposição e do número de pontos de monitoramento do conteúdo de água no solo (CAS) em espaço uni, bi e tridimensional na determinação da evapotranspiração do maracujazeiro, pelo método do balanço de água no solo; (II) desenvolver um critério para o posicionamento dos sensores de CAS, visando o melhor desempenho do (BAS) e manejo da irrigação. O maracujazeiro foi cultivado em um ambiente protegido e a evapotranspiração foi medida por um lisímetro de pesagem instalado no centro do pomar, usando uma plataforma de pesagem. No interior do lisímetro 32 sondas de TDR dispostas em diferentes distâncias e profundidade, de modo a formar perfis de monitoramento uma 1D, duas 2D e três dimensões 3D para monitoramento de θ na zona radicular. A ET_c determinada por BAS em 2D/3D foi similar a ET_c determinada no lisímetro. Isso possibilita identificar um local específico que represente a extração média de água no solo dentro do bulbo molhado ou zona radicular, para posicionar ou atuar no manejo da irrigação. No caso específico deste experimento, por exemplo, verificou-se que a instalação de uma única sonda entre 0 e 0,3 m de profundidade e a 0,10 m de distância do gotejador, permitiu a obtenção de valores de ET_c próximos aos obtidos por lisímetro de pesagem. Os resultados desse estudo representam outro passo na busca pelo desenvolvimento de critérios para o posicionamento de SAS, que é particularmente útil e necessário para tornar o manejo da irrigação por gotejamento mais acurado.

PALAVRAS CHAVE: evapotranspiração, posicionamento de sensores, irrigação localizada

SENSOR PLACEMENT IN 2D/3D WETTING PATTERNS FROM DRIP IRRIGATION FOR QUANTIFICATION OF EVAPOTRANSPIRATION

Author: Francisco Airdesson Lima do Nascimento.

Adviser: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva.

ABSTRACT: Variability of water extraction in the root zone is a difficulty in determining criteria for sensor placement aimed at soil water balance and irrigation management. On the other hand, detailed knowledge on the water extraction variability can be the key point to define criteria for sensor placement and put an end to arbitrary decisions. The objective of this study was: (i) to evaluate the influence of sensor placement in one, two and three-dimensional space on the determination of passion fruit evapotranspiration by the soil water balance method (SWB); (ii) develop a placement criterion for SWS installation, aiming at better SWB performance and irrigation management. Passion fruit was cultivated in a protected environment and its evapotranspiration (ET_c) was measured by a weighing lysimeter installed in the center of the orchard, using a weighing platform. Inside the lysimeters, 32 TDR sensors were arranged in different positions in order to form one (1D), two (2D) and three-dimensional (3D) monitoring of θ in the root zone. ET_c determined by SWB in 2D/3D was similar to the ET_c determined by lysimetry. It possible to identify a specific location that can represent the average water extraction within the wet bulb zone or in the root zone, for placing or actuating sensors for irrigation management. In the specific case of this experiment, for example, it was found that the installation of a single probe between 0 and 0.3 m depth and at 0.10 m distance from the dripper allowed obtaining ET_c values close to those obtained by weighing lysimeter. The results of this study represent another step in the search for developing general criteria for SWS positioning, which is particularly useful and necessary to make drip irrigation management accurate. However, considering that the study was carried out under a highly controlled condition, with a specific crop, cultivated in a protected environment, with a consistent irrigation management criterium, future studies are necessary for the implementation of generalist criteria.

KEY WORDS: evapotranspiration; sensor placement; drip irrigation

1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ETc), pode ser entendida como um processo biofísico, composto pela evaporação e transpiração das plantas. O conhecimento deste processo é indispensável para o correto manejo da irrigação. A ETc pode ser determinado por diversos métodos, por exemplo: razão Bowen, evaporímetros, lisímetria, estimativas por métodos empíricos e o balanço de água no solo (BAS). Dentre estes métodos, requer o conhecimento de dinâmica da água no solo em aproximadamente 95% da zona radicular de uma cultura irrigada.

O balanço de água no solo envolve os processos de entrada e saída da água em um espaço definido de solo, geralmente sendo esse ocupado pela zona radicular. Os processos de entrada são: infiltração da água pela (precipitação e/ou irrigação), e ascensão capilar; enquanto os processos de saída são: drenagem interna (ou percolação), deflúvio superficial, deflúvio subsuperficial e evapotranspiração (evaporação + transpiração). Tais processos são também conhecidos como componentes do balanço de água no solo.

Sensores de água no solo (SAS) são muito usados para monitorar as tendências de água no solo para tomada de decisão na irrigação e quantificar o balanço de água no solo. No entanto, a acurácia das determinações do conteúdo de água no solo (CAS) para quantificar o balanço de água no solo é muito mais difícil. Uma importante questão na tomada de decisão em processos hidro agrícolas é o posicionamento de sensores de água no solo na zona radicular das culturas para obter os valores os resultados do conteúdo de água no solo.

O adequado posicionamento dos sensores de água no solo é especialmente importante em culturas irrigadas por gotejamento porque, ao contrário de outros sistemas de irrigação, o padrão de umedecimento do solo a partir do emissor sofre variação em um padrão tridimensional e ocupa uma fração do solo e sofre uma intensa variabilidade da extração de água na zona radicular em curtos intervalos de tempo e de distância do solo. Por exemplo Silva et al. (2015) em um experimento em campo observaram que valores de evapotranspiração determinados pelo balanço de água no solo podem variar em até 297% a depender do posicionamento dos sensores na zona radicular. Além

disso, a biologia das raízes afeta o padrão de extração de água, tais como a maturação, número e diâmetro dos vasos xilemáticos, bem como as diferenças na formação da endoderme e exoderme com o desenvolvimento das raízes (STEUDLE & FRENCH, 1996; BARROWCLOUGH et al., 2000; WATT et al., 2008; DRAYE et al., 2010). Dada essa complexidade, o padrão de umedecimento e de extração em irrigação por gotejamento podem ser obtidos por medições diretas usando os sensores de água instalados no solo (VIDANA GAMAGE et al., 2018; BADR & ABUARAB, 2013; SILVA et al., 2019), por meio de métodos analíticos (WARRICK, 1974; COELHO & OR, 1997), métodos semianalíticos (MMOLAWA & OR, 2000) ou por meio de modelos de simulação com Hydrus (ŠIMŮNEK et al., 2016). Subbaiah (2013) revisou e apresentou informações detalhadas sobre o desenvolvimento desses modelos e de suas categorias.

Quando aplicado a culturas, o monitoramento direto usando sensores instalados no solo é realizado em um espaço unidimensional definido com base no comprimento do sistema radicular (DINGRE & GORANTINWAR, 2020; LI et al., 2018; SRIVASTAVA et al., 2016). No entanto, a quantidade e o local para o posicionamento dos sensores de água no solo vem sendo decidido de maneira arbitrária, trazendo uma limitação para o método (SILVA et al., 2018; SILVA et al., 2015). Na ausência de critérios, estudos com o objetivo de obter medidas precisas dos componentes do balanço de água no solo usam um maior número de sensores no solo (PALOMO et al., 2002; GUNDUZ et al., 2011).

Silva et al. (2019) estudou o efeito do posicionamento de sensores para estimativa da ET_c com o modelo hidrológico SWAP (KROES et al., 2017) e verificaram que a ET pode variar em 3,6 mm dia⁻¹ dependendo do posicionamento de sensores utilizada. Apesar da variabilidade, estudos recentes apontaram pontos específicos de posicionamento que representem os valores médios de conteúdo de água no solo obtida para todo o período de irrigação e recomendam essa metodologia para o manejo da irrigação. Considerando os sensores de água no solo (SOULIS et al., 2015; ZHAO et al., 2018; SILVA et al., 2018; SOULIS & ELMALOGLOU, 2016) com a capacidade de mensurar em tempo real o conteúdo de água com baixo custo, realizando medições diretas com um número maior de sensores em regiões do solo ocupado pelas raízes,

apresenta-se como uma alternativa desafiadora para o manejo da irrigação com precisão e a automação dos sistemas de irrigação. Esse desafio é ampliado em se tratando da irrigação por gotejamento, onde a infiltração de água no solo se apresenta de maneira 3D/2D e a distribuição dos sensores em 1D não é apropriada.

Espera-se que um conjunto 3D de sensores seja apropriado para determinar o balanço de água no solo e o manejo da irrigação. Acreditando que as sondas dispostas em 2D também funcionaria bem, uma vez que a infiltração pode ser concebida em duas dimensões, pergunta-se também se a disposição de uma matriz 1D, distribuídas próximo dos emissores, de maneira que representem de forma geral a zona das raízes, e de maneira mais desafiadora se um único sensor for o suficiente para determinar o balanço de água no solo, desde que se conheça as condições de solo/cultivo/ sistema de irrigação. Diante do exposto o objetivo do trabalho foi: (I) avaliar a influência da disposição e do número de pontos de monitoramento do conteúdo de água no solo em espaço uni, bi e tridimensional na zona radicular do maracujazeiro para determinação da evapotranspiração, pelo método do balanço de água no solo (BAS); (II) desenvolver um critério para o posicionamento dos sensores de água no solo (SAS), visando o melhor desempenho do balanço de água no solo e manejo da irrigação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências do Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS), da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) em Cruz das Almas-Ba, localizada nas coordenadas geográficas (Latitude: 12° 39' 11" Sul, Longitude: 39° 7' 19" Oeste). O interior da casa de vegetação contou com 36 caixas de fibra de vidro com área de 1,21 m² (0,9 m de profundidade; 1,1 m de largura e 1,1m de comprimento) que foram utilizadas para cultivo, com 1 lisímetro equipado com 32 sensores de TDR e uma plataforma de pesagem. O solo utilizado para preenchimento das caixas é classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso, com 68 % de areia e 12 % de argila, textura franco-arenoso.

A cultura implantada foi a do maracujazeiro (*Passiflora edulis* Sims), variedade “Gigante amarelo”. As mudas propagadas sexuadamente foram obtidas a partir da sementeira em tubetes preenchidos com terra vegetal. Após atingirem 0,1 m de altura, foram transferidas para sacos plásticos com volume de 0,002 m³ preenchidos com substrato Dripsoil, onde permaneceram até atingirem 0,3 m de altura (idade aproximada de 60 dias), momento em que as mudas foram transplantadas para as caixas. O espaçamento entre plantas adotado foi de 2,0 x 1,5 m e o sistema de tutoramento que se adotou foi o do tipo “espaldeira vertical”.

Em seguida, foi realizada a adubação na cova de plantio e o transplântio das mudas, para as unidades experimentais (caixas). A adubação de plantio foi realizada com macro e micronutrientes, seguindo as recomendações de Lucas et al. (2012).

Como o ambiente foi fechado e não houve polinização por agentes naturais, a polinização foi realizada manualmente, logo que ocorria à antese. Esse procedimento foi realizado diariamente.

2.1 Instrumentação utilizada

Para o monitoramento do conteúdo de água no solo foram utilizadas sondas de reflectometria no domínio do tempo (Time-Domain-Reflectometry – TDR) acopladas a um reflectómetro modelo TDR 100 da Campbell Scientific. As sondas de TDR utilizadas apresentavam as seguintes características: três hastes de aço inoxidável com comprimento fora da resina de 0,1m e espaçadas entre si por 0,017 m; cabos coaxiais de 50 ohms; comprimento da camada de resina de poliéster no início das hastes de 0,05 m. As sondas foram calibradas em laboratório. Para calibração, foram utilizados três tubos PVC de 0,075 m de diâmetros e 0,20 m de altura. Na parte inferior dos tubos, foram colocadas duas malhas, com a finalidade de apenas permitir a passagem de água para o exterior do tubo e não perder partículas de solo. Os tubos foram preenchidos com solo da área experimental, seco ao ar e destorroado, atingindo mantendo a densidade próxima de 1,3 kg dm⁻³. As sondas de TDR foram posicionadas no centro dos tubos com solo, até cobrirem completamente suas hastes. Os tubos com solo e sonda foram imersos por 24 horas em um recipiente com água visando a saturação

do meio. Após a saturação foram realizada uma série de leituras da massa (kg) do conjunto tubo – sonda – solo – tela, para obtenção do conteúdo da água no solo conforme a equação 1:

$$\theta = \left(\frac{M1 - M2}{M2 - M3} \right) * \frac{ds}{da} \quad (1)$$

Em que: θ é o conteúdo de água no solo ($m^3 m^{-3}$); M1 é a massa do conjunto tubo, solo úmido, sonda e tela (kg); M2 é a massa do conjunto tubo, solo seco, sonda e tela (kg); M3 é a massa do tubo, sonda e tela (kg); ds é a densidade do solo ($1,3 \text{ kg dm}^{-3}$); da é a densidade da água ($1,0 \text{ kg dm}^{-3}$).

Cada valor de θ obtido foi associado a um correspondente valor ka (obtido pelo reflectómetro). Com esse processo foi obtido o a curva de calibração que pode ser vista na equação 2.

$$\theta = 5,222 * 10^{-6}ka^3 + 0,0002ka^2 + 0,0064ka + 0,0405 \quad R^2 = 0,994 \quad (2)$$

Para medida da evapotranspiração do maracujazeiro (ETc) foi montado um lisímetro de pesagem, utilizando-se uma plataforma de pesagem com a capacidade de 2000 kg e com aproximação de 0,10 kg. O lisímetro foi localizada no centro da estufa e equipado com um sistema de drenagem composto por três tubos de PVC de 0,05 m de diâmetro interno, com furos de 0,0005 m, funcionando como drenos laterais que descarregavam o volume a ser drenado em um sistema coletor de água. A 0,15 m acima dos drenos foi colocado uma camada de brita (diâmetro específico de 10 mm), e uma camada de 0,15 m de areia lavada.

A plataforma de pesagem foi calibrada tomando como base a associação de sinal emitido em milivolt por volt ($mV V^{-1}$) com a massa (kg) conhecida aplicada na plataforma de pesagem. As variações de sinais emitidas pela plataforma devido as alterações de massa aplicadas foram armazenadas por um datalogger CR800 – Campbell Scientific. A função de correlação entre a massa e o sinal foi obtida por uma equação linear:

$$\text{massa do lisímetro} = 874,3 * (\text{sinal}) - 1336,3 \quad R^2 = 0,999 \quad (3)$$

2.2 Sistema e manejo de irrigação

O método de irrigação utilizado foi o de microirrigação, composto por um sistema de gotejamento. As linhas laterais foram localizadas à 0,05 m do caule

da planta, com dois emissores por planta, espaçados entre si em 0,15 m. Tais emissores eram do tipo autocompensado, com vazão de 2 L h⁻¹.

O intervalo entre irrigações adotados foi de 2 dias. Em cada irrigação, o volume de água aplicado foi o necessário para retornar o conteúdo de água no solo para próximo da capacidade de campo (0,20 m³ m⁻³), equivalente ao potencial de 10 KPa. Para isso, os valores do conteúdo de água no solo foram obtidos com sondas de TDR instaladas nas profundidades (Z) de 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40m e nas distâncias (R) da planta de 0,10 e 0,25 m. De posse dos dados do conteúdo de água no solo, a lâmina de irrigação foi calculada conforme equação 4:

$$IRN_r = \sum_{Z=0,10\ m}^{Z=0,40\ m} (\theta_{cc} - \theta_{atual}) * Z \quad (4)$$

em que: IRN_r - Irrigação real necessária calculada para as sondas instaladas em uma distância "X"; θ_{cc} -conteúdo de água no solo referente a capacidade de campo (m³ m⁻³); θ_{atual} - conteúdo de água no solo antes de cada irrigação (m³ m⁻³); Z- Profundidade (500 mm). Z-0,10 m é o posicionamento da sonda de TDR das sondas superiores e Z-0,40 m é o posicionamento da sonda inferior de TDR.

A irrigação real necessária aplicada nos intervalos de irrigação foi obtida com a média entre os valores calculados para X=0,10 m e X=0,25 m, conforme a equação 5.

$$IRN_{m\u00e9dia} = \frac{(IRN_{0,10\ m} + IRN_{0,25\ m})}{Nr} \quad (5)$$

em que: Nr- Número de sondas utilizadas no cálculo da lâmina de irrigação.

A irrigação foi ajustada para as condições da área molhado pelos emissores com o uso da equação 6.

$$ITN = \frac{[IRN\ m\u00e9dia * (\pi * R^2)]}{Ef} \quad (6)$$

em que: ITN - Irrigação total necessária (Litros); R- Raio molhado do bulbo molhado (m) determinada, conforme descrito no tópico a seguir; Ef- eficiência de irrigação de (95 %.)

2.3 Determinação do raio e área de solo molhada pelo emissor

Para determinação do raio e área de solo molhada pelo emissor foram utilizadas dezesseis sondas de TDR distribuídas em quatro distâncias da planta (X): 0,10; 0,25; 0,40 e 0,55 m e quatro profundidades (Z): 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m. O esquema de distribuição das sondas no solo é ilustrado na figura 1

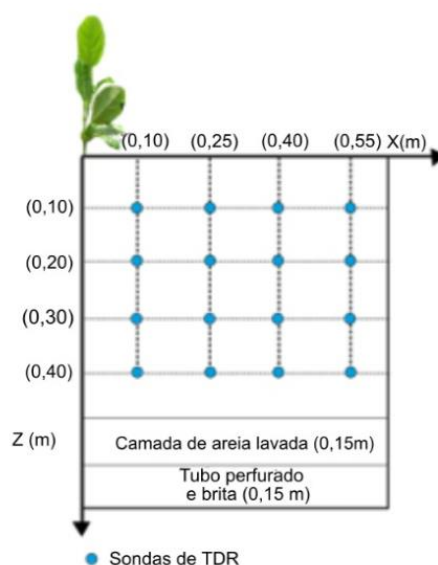


Figura 1- Distribuição das sondas para determinação da área de solo molhada (A_w) pelo emissor.

A determinação de A_w foi realizada com dados de conteúdo de água no solo obtidos continuamente nas dezesseis sondas de TDR. O movimento da água aplicada pelo emissor ao solo foi monitorado do início da irrigação até às oito horas após o fim. Durante este período, a forma da área do bulbo foi entendida como um corte bidimensional da frente de molhamento, obtida pelo monitoramento contínuo e automático do conteúdo de água, medido nas dezesseis sondas. Posteriormente, utilizou-se o software Surfer (versão 7.4.0.37) com os dados do conteúdo de água no solo para determinação do desenho bidimensional do raio do bulbo molhado.

A distância máxima de alcance da frente de molhamento foi definida pela média dos dados obtidos em seis eventos de irrigação. A área molhada

encontrada para o manejo de irrigação foi de 0,3848 m², tendo um raio de distribuição máximo de 0,35 m.

2.4 Determinação da ET_c por lisimetria e balanço de água no solo.

A determinação da ET do maracujazeiro foi monitorada e armazenada com base nas variações de massa observadas no lisímetro de pesagem com base na irrigação e a percolação profunda diariamente.

Os valores de ET_c diária foram determinados com base nos princípios do BAS:

$$ET_c = I - D + \Delta m \quad (7)$$

em que: ET_c é a ET do maracujazeiro (Litros dia⁻¹), I é a irrigação aplicada (Litros), D é a percolação interna (Litros), e Δm é as variações de massa diária do lisímetro (equivalente a litros). O lisímetro foi equipado com um sistema de drenagem para coletar os valores de D, porém durante o período do experimento não ocorreu a D.

Para determinação da ET_c por balanço de água no solo, as sondas de TDR foram instaladas nas profundidades (Z) de: 0,10 m; 0,20 m; 0,30 m e 0,40m e nas distâncias (X e Y), a partir do centro do lisímetro de: 0,10 m; 0,25 m; 0,40 m e 0,55 m. Neste sentido, X e Z formaram um plano bidimensional de monitoramento de θ , composto por 16 sondas (Figura 2 – esquerda); e X, Y e Z formaram um plano tridimensional de monitoramento de θ (Figura 2 – direita).

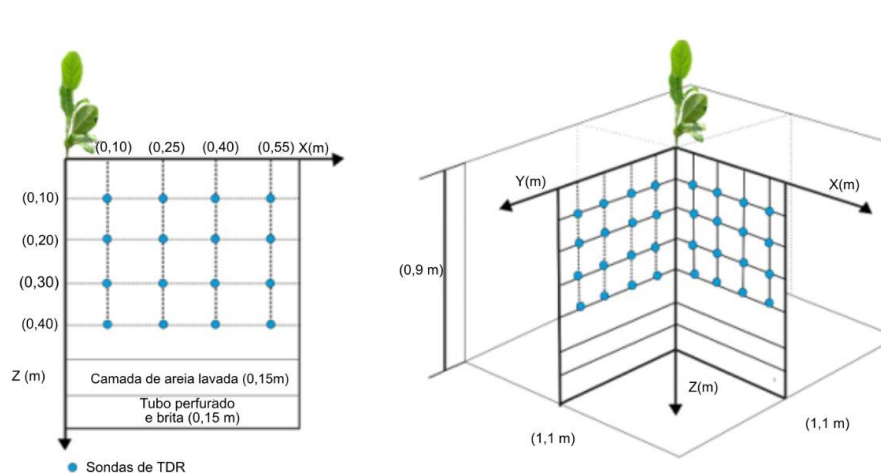


Figura 2- Perfil bidimensional X, Z (esquerda) e tridimensional X, Y e Z (direita) do monitoramento da água no solo.

Os dados foram coletados com auxílio de uma TDR100, acoplada a um datalogger CR 800 e 4 multiplexadores (SDM50). Procedeu-se a elaboração de um programa em linguagem basic para leitura e armazenagem dos valores de k_a obtidos nas 32 sondas de TDR instaladas no interior do lisímetro de pesagem.

O balanço de água no solo foi realizado utilizando-se da equação 8 desprezando-se a existência de deflúvios e ascensão capilar.

$$ET_c = I - \Delta h - D \quad (8)$$

Em que: I-irrigação aplicada (Litros); Δh - variação da armazenagem de água no solo (Litros), D é a drenagem (Litros). A lâmina de irrigação foi obtida usando o bulbo molhado, determinado conforme a seção 2.3.

Para o cálculo da variação de armazenagem foram considerados as configurações de monitoramento do conteúdo de água no solo descritas na tabela 1.

Tabela 1- Cenários das distribuições das sondas no lisímetro, para estimativa de evapotranspiração.

Posicionamento dos sensores em três dimensões (3D)	
Perfis X,Y e Z	Número de sondas
Eixo Z- (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m), eixos X e Y	32
Posicionamento dos sensores em duas dimensões (2D)	
Perfis X e Y	Número de sondas
Z (0,10 m+ 0,25 m) e X	8
Z (0,10 m + 0,25 m + 0,40 m) e X	12
Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m) e X	16

Posicionamento dos sensores em uma dimensão	
(1D)	Número de sondas
Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m) , localizado em X (0,10 m)	4
Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m), localizado em X (0,25 m)	4
Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m), localizado em X (0,40 m)	4

A determinação da variação de armazenagem foi expressa pela diferença entre os valores de θ obtidos antes duas irrigações consecutivas. Equações 9,10,11 e 12 que foi adotado consecutivamente para o monitoramento unidimensional, bidimensional, tridimensional e para uma única sonda.

$$\Delta h_{(1D)} = \left(\int_0^Z \theta(Zi)_{t2} dz - \int_0^Z \theta(Zi)_{t1} dz \right) \quad (9)$$

$$\Delta h_{(2D)} = \left[\frac{\sum_{X=1}^4 \left(\int_0^Z \theta(Zi)_{t2} dz - \int_0^Z \theta(Zi)_{t1} dz \right) * (\pi * R^2)}{Xn} \right] \quad (10)$$

$$\Delta h_{3D} = \frac{(\Delta h_{perfil (X,Z)} + \Delta h_{perfil (Y,Z)})}{Np} \quad (11)$$

$$\Delta h_{(XiZi \text{ and } YiZi)} = [\theta(Zi)_{it2} - \theta(Zi)_{it1}] * Z \quad (12)$$

em que: Δh_R - Variação de armazenagem em um perfil unidimensional de monitoramento com 4 sondas (Litros); $\Delta h_{(2D)}$ Variação de armazenagem em um plano bidimensional (Litros); $\Delta h_{(X,Z)}$ - Variação de armazenagem no perfil bidimensional X,Z (Litro); $\Delta h_{(Y,Z)}$ - Variação de armazenagem no perfil bidimensional Y,Z (Litro) $\Delta h_{(3D)}$ - Variação de armazenagem em um perfil tridimensional (Litro); $\theta(Zi)_{t1}$ - Valor do conteúdo de água no solo antes do início da irrigação em um ponto de monitoramento ($m^3 m^{-3}$); $\theta(Zi)_{t2}$ - Valor do conteúdo de água no solo antes da irrigação subsequente em um ponto de monitoramento ($m^3 m^{-3}$); X, Y e Z- são os limites de distância e profundidade tomados como condições para o cálculo da variação de armazenagem; Xn- Número de distâncias de monitoramento

considerados para o cálculo de variação de armazenagem em condições bidimensionais; N_p - Número de perfis de monitoramento de θ . R - é o raio molhado no solo pelo emissor $\theta(Z_i)_{t1}$ - θ antes da irrigação ($m^3 m^{-3}$); Z - Profundidade de monitoramento (500 mm). Para converter os resultados das equações 9,10,11 e 12 em volume, foi considerado a área do bulbo molhado presente na seção 2.3.

A comparação entre os valores de ET_c medidos e estimados foi feita seguindo recomendações de Tedeschi (2006). Um modelo de regressão linear simples ($y= ax+b$) foi obtido da relação entre ET_c medida no lisímetro e ET_c obtida por balanço de água no solo. O modelo obtido foi sujeito à hipótese de nulidade conjunta dos parâmetros estimados a e b : $H_0: a=1$ e $H_0: b= 0$, comprovando-se ou rejeitando-se tais hipóteses por meio do teste F sugerido por (MAYER et al., 1994), com um grau de confiança de 95%. Considerou-se a raiz do erro médio ao quadrado (RMSE) e o erro máximo absoluto, como análise complementar.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

$$EMAX = \max\{|P_i - O_i|\}_{i=1}^n \quad (14)$$

Em que: P_i - Evapotranspiração estimada pelo balanço de água no solo (L); O_i - Evapotranspiração medida pelo lisímetro.

2.5 Determinação da distribuição de raízes.

Foi determinada distribuição de raízes para um perfil bidimensional, seguindo os mesmos pontos de distribuição das sondas do conteúdo de água no solo.

Para realizar a coleta de solo visando a distribuição das raízes foi aberta uma trincheira e se coletou amostras com dimensões de $0,001 m^3$, nas posições equivalentes a instalação das sondas de TDR.

As raízes foram separadas do solo e em seguida foram digitalizadas e submetidas ao software "SAFIRA" (versão 1.0.1) para determinação do volume de raiz por volume de solo (VRVS). Com o auxílio do software "SURFER" (versão

7.4.0.37) os resultados de VRVS foram integrados e deram origem a mapas com isolinhas para distribuição das raízes no solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 é apresentado o padrão de distribuição de conteúdo de água no solo 1 hora antes da irrigação e 3,6,12, 24 e 47 horas após a irrigação. As maiores variações no conteúdo de água no solo ocorrem nas camadas próximas ao emissor e ao caule da planta. Valores próximos da capacidade de campo podem ser observados em diferentes pontos e diferentes tempos. A frente de molhamento atinge aproximadamente 0,40 m de profundidade e 0,30 de distância da planta e do gotejador. As zonas de maior variação do conteúdo de água no solo, ocasionado pela extração de água no solo coincidem com a região de bulbo molhado, com isso podemos hipotetizar que a busca pelo posicionamento de sensores pode partir do conhecimento dessa região. Comparando a figura 3 com a figura 9 é possível notar que as zonas de extração coincidem com as zonas de maior umedecimento do solo, com a variação da extração dentro dessas zonas.

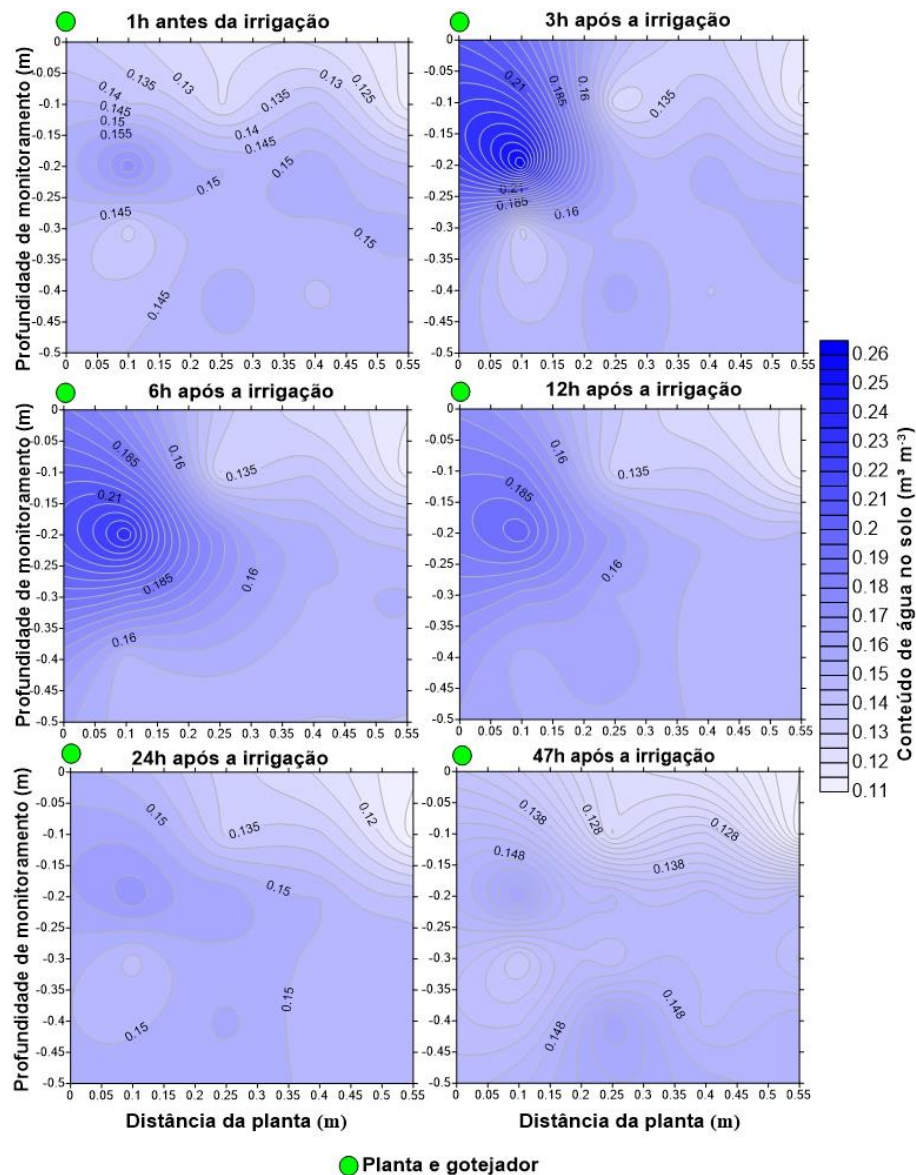


Figura 3- Distribuição da umidade em um intervalo de irrigação.

3.1 E_{Tc} medida em lisímetro versus E_{Tc} obtida pelo balanço de água no solo em dimensões uni, bi e tridimensional

Na Figura 4 é apresentada a correlação entre a evapotranspiração do maracujazeiro obtido em lísimetro e a estimativa de E_{Tc} por SWB com as sondas dispostas em 3D. Conforme o observado o valor P do teste de Mayer foi maior que 0,050 indicando que não foi encontrado diferença significativa, indicando que é possível estimar a E_{Tc} do maracujazeiro com a técnica de SWB.

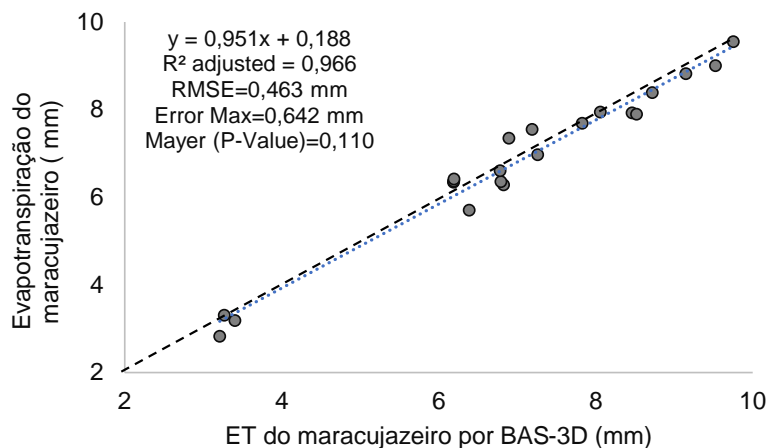


Figure 4- Correlação entre a evapotranspiração estimada do maracujazeiro com o balanço de água no solo e a evapotranspiração do maracujazeiro obtida no lisímetro.

Na figura 5 é apresentada a correlação entre as estimativas de ET_c do maracujazeiro em duas e três dimensões (2D e 3D). A correlação entre os valores estimados nas condições 2D e 3D apresentou um coeficiente de determinação considerado como excelente, e um RMSE baixo.

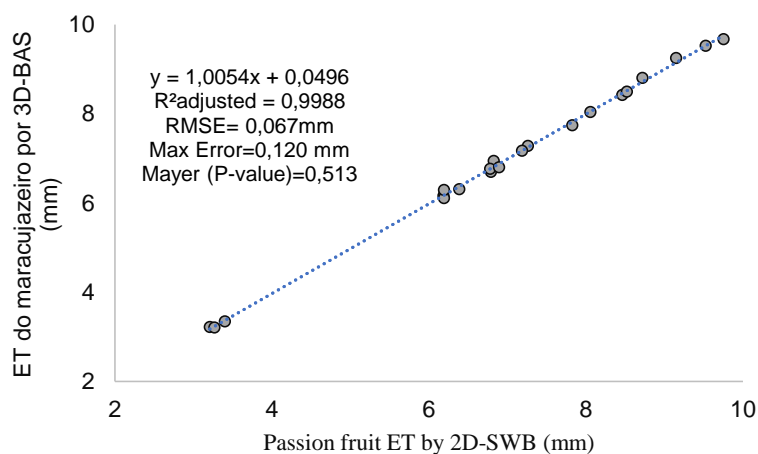


Figura 5- Correlação entre a estimativa de evapotranspiração do maracujazeiro com as sondas distribuídas em duas e três dimensões.

A correlação entre os valores de ET_c estimados pelo balanço de água no solo em 2D e 3D não mostrou diferença significativa. Isso ocorreu por que o bulbo molhado é aproximadamente simétrico ao redor do perfil vertical Z. A variabilidade temporal da armazenagem de água no solo (Δh) determinados em 2-3D apresentam padrões similares. Por exemplo, em um período contínuo

(figura 6) a maior diferença de Δh entre as condições Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m), X e Y e Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m), X, foi igual a 0,12 litros dia⁻¹ e a menor foi de 0,004 litros dia⁻¹. Silva et al. (2015), trabalhando com uma abordagem similar, porém com a cultura da banana, indicou que ao utilizar uma disposição 2D ou 3D para monitoramento de conteúdo de água no solo não promove diferenças nos valores de ET_c calculados com balanço de água no solo.

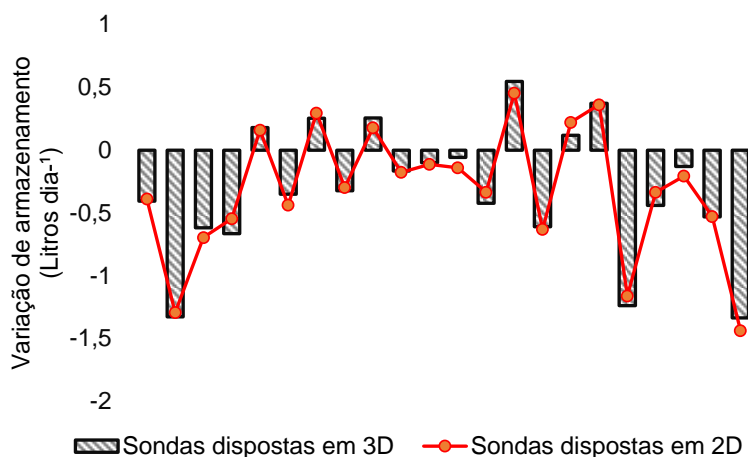


Figura 6- Comparação da variação de armazenagem obtidas em espaços bi e tridimensionais.

A Figura 7 apresenta as correlações entre os resultados de ET_c medida pelo lisímetro de pesagem e estimada pelo balanço de água no solo 2D, com as sondas distribuídas em espaço bidimensional, em quantidades e posições diferentes. Independentemente da quantidade e da posição dos sensores em 2D, os valores de ET_c obtidos pelo balanço de água no solo foram semelhantes aos valores obtidos pelo lisímetro. Analisando os cenários que formaram a distribuição das sondas em espaços 2D no solo, os menores erros na obtenção da ET_c pelo balanço de água no solo foram encontrados com a com a disposição das sondas em Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m) e X-, sendo o RMSE igual a 0,40 mm e o erro máximo igual a 0,70 mm. Por outro lado, Erro Max= 1,12 mm foi encontrado quando se determinou a ET_c pelo balanço de água no solo com dados provenientes das sondas instaladas em Z (0,10 m + 0,25 m) e X.

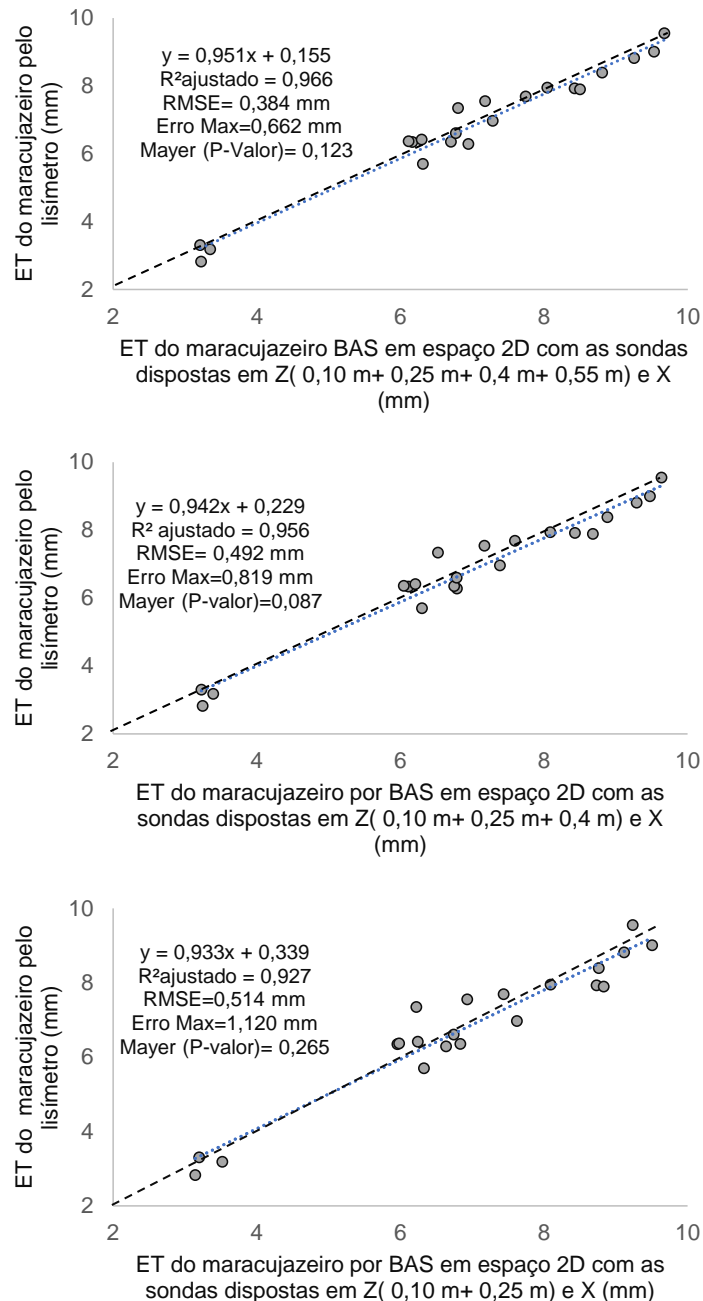


Figura 7- Desempenho da estimativa da evapotranspiração do maracujazeiro pelo balanço de água no solo em duas dimensões.

A diminuição no número de sondas utilizadas no monitoramento da água no solo elevou o erro na determinação da ET_c pelo balanço de água no solo. Este fato pode estar relacionado a existência de variabilidade na distribuição da água no solo proveniente da irrigação e a variabilidade da extração de água na zona radicular durante um ciclo de irrigação. Logo, o maior número de pontos monitorados apresentam uma maior abrangência dessas variações diminuindo os erros nas estimativas. Isso foi observado por Silva et al. (2015) trabalhando

com bananeira irrigada e também foi evidenciado por Nascimento et al. (2019) que estudou a variabilidade da Δh do meloeiro irrigado por gotejamento em condições semiáridas.

Kisekka et al. (2019) investigaram em condições de campo, com irrigação por gotejamento e microasperção, a influência do número de tubos de acesso e de pontos de monitoramento do conteúdo de água no solo com FDR na precisão e acurácia das estimativas de lixiviação. Esses autores observaram que com a diminuição dos números de pontos de monitoramento do conteúdo de água, as estimativas de lixiviação utilizando o balanço de água no solo como técnica, sofre uma superestimativa quando se comparado ao maior número de pontos de monitoramento.

Na condição em que se tem o monitoramento do conteúdo de água no solo em uma única dimensão, foi observado que ao se instalar as sondas em Z (0,10 m + 0,25 m + 0,40 m + 0,55 m) e X (0,10 m), proporcionou um RMSE igual a 0,60 mm e um erro máximo de 1,2 mm em relação ao que foi medido pelo lisímetro (Figura 8). As sondas instaladas em uma dimensão em Z (0,10 m + 0,25 m + 0,40 m + 0,55 m) e X (0,25 m) apresentaram um RMSE de 0,5 mm e um erro máximo de 1,1 mm, indicando que nas condições em que foi montada o experimento essa distância se configura como o local que promove valores mais acurados, sendo esse comportamento exclusivo para condição descrita. Os resultados desse estudo representam outra etapa na busca pelo desenvolvimento de critérios gerais para o posicionamento de SAS, que é particularmente útil para tornar o manejo da irrigação por gotejamento mais preciso. No entanto, considerando que o estudo foi conduzido em condições altamente controlada, com uma cultura específica, cultivada em ambiente protegido, com um critério de manejo de irrigação único, estudos futuros são necessários para critérios mais generalistas.

As duas condições apresentaram valores que ficaram próximos a reta 1:1, e o teste de nulidade conjunta indicou a não diferença entre as estimativas e os valores obtidos pelo lisímetro de pesagem. Esses resultados são exclusivos para a condição de um espaço unidimensional. Ainda na Figura 8, as sondas instaladas em Z (0,10 m + 0,25 m + 0,40 m + 0,55 m) e X (0,40 m) de distância apresentaram os maiores valores para o RMSE e erro máximo para a condição

de 1D, e observa-se que a linha de tendência se distancia da reta 1:1, indicando que as estimativas por essa configuração apresentam pouca precisão em relação a evapotranspiração medida, causando superestimativas dos resultados. Indicando que em casos de limitação com o número de sondas, a instalação distante do bulbo molhado irá estimar valores acima ou abaixo da realidade. Isso é comprovado pelo teste de nulidade conjunta de Mayer, mostrando que existe diferença significativa entre a ET_c estimada pelo balanço de água no solo e a observada no lisímetro.

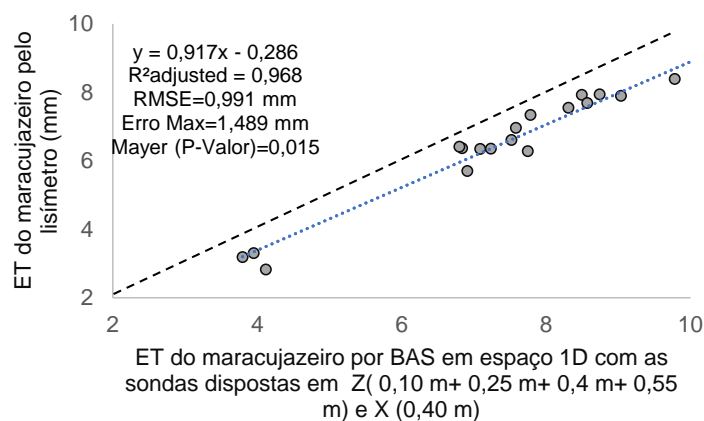
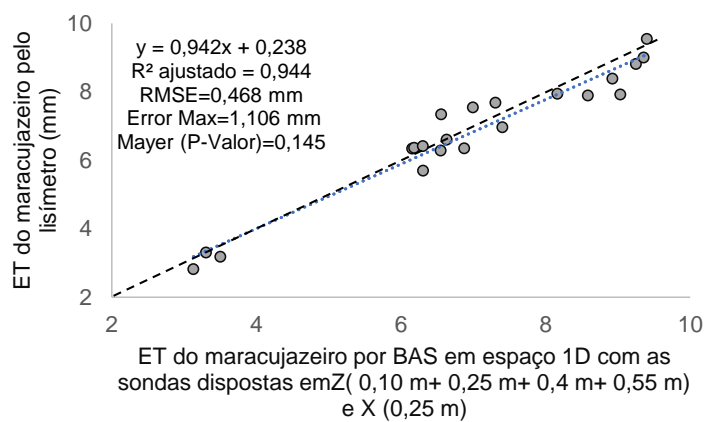
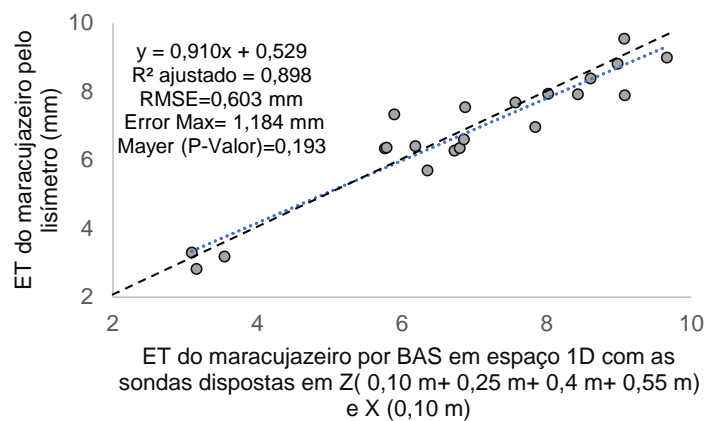


Figura 8- Correlação da evapotranspiração estimada com as sondas instaladas em uma disposição unidimensional com a evapotranspiração obtida em lisímetro de pesagem.

O maior Erro Max 1,5 mm, observado para condição de disposição das sondas em 1D [Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m) e X (0,40 m)], mostram que um número maior de pontos de monitoramento é necessário para se obter valores de ETc mais acurados quando usar a técnica do balanço de água no solo.

A baixa precisão e acurácia nas estimativas de evapotranspiração por meio do balanço de água no solo com dados provenientes das sondas instaladas em espaços unidimensionais, especificamente na disposição das sondas em Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m) e X (0,40 m), ocorrem porque, nestas posições o fluxo de extração de água na zona radicular do maracujazeiro é baixo. Essa baixa intensidade no fluxo da extração de água pode ser observada na figura 9, no qual a disposição das sondas em Z (0,10 m + 0,25 m+ 0,40 m + 0,55 m) e X (0,40 m), enquanto a maior intensidade ocorre entre 0 e 0,3 m de distância da planta e 0,10 a 0,4 m de profundidade.

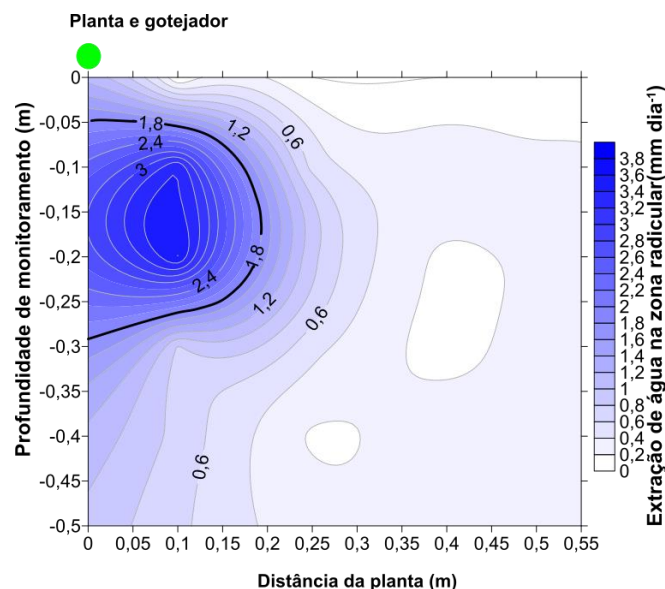


Figura 9- Média de extração de água na zona radicular do maracujazeiro.

3.2 Determinação do balanço de água no solo utilizando um ponto de monitoramento.

A precisão e acurácia da estimativa da ETc realizada com dados do conteúdo de água no solo provenientes de apenas um ponto de monitoramento variam de acordo o local de instalação das sondas. Os valores da ETc estimados com dados de conteúdo de água no solo obtidos em 12 das 16 posições unitárias avaliadas, diferenciaram-se de forma significativa dos valores da ETc obtidos no lisímetro. No caso das 4 sondas fornecedoras dos dados do conteúdo de água no solo que resultaram em valores da ETc semelhantes aos medidos pelo lisímetro, todas encontravam-se instaladas dentro do bulbo molhado pelo emissor (Tabela 2).

Ainda na tabela 2, as estimativas que mostraram melhor desempenho em relação aos valores obtidos pelo lisímetro foram as que utilizaram os dados de conteúdo de água no solo obtidos com a sonda instalada a 0,25 m de distância e 0,10 m de profundidade (X25Z10), indicando um RMSE de 0.5 mm dia⁻¹ e um coeficiente de correlação igual 0,91. Porém, as estimativas com os dados obtidos das sondas X10Z10, X10Z20, X10Z30 e X25Z20, também não apresentaram diferença em relação aos valores medidos no lisímetro. Essas posições podem ser indicadas para monitoramento do conteúdo de água no solo para manejo de irrigação e determinação do balanço de água no solo.

Tabela 2-Desempenho e estatística das estimativas de evapotranspiração do maracujazeiro em relação a evapotranspiração medida.

Cenário	Coefficiente β_0 e seu desvio	Coefficiente β_1 e seu desvio	R ² Ajustado	RMSE (mm)	Mayer (p-valor)
X10Z10	0,837 ± 0,092	1,187 ± 0,810	0,837	0,708	0,168
X10Z20	0,884 ± 0,089	0,900 ± 0,845	0,868	0,756	0,187
X10Z30	0,866 ± 0,103	0,816 ± 0,784	0,841	0,727	0,194
X10Z40	0,763 ± 0,112	1,235 ± 0,911	0,761	1,091	0,0431
X25Z10	0,923 ± 0,066	0,551 ± 0,574	0,910	0,531	0,086
X25Z20	0,899 ± 0,083	0,663 ± 0,635	0,886	0,723	0,143
X25Z30	0,836 ± 0,084	1,016 ± 0,569	0,889	0,607	0,013
X25Z40	0,868 ± 0,067	0,451 ± 0,623	0,878	0,625	0,022
X40Z10	0,877 ± 0,065	0,823 ± 0,534	0,892	0,585	0,015
X40Z20	0,854 ± 0,058	0,632 ± 0,588	0,899	0,567	0,017

X40Z30	0,822 ± 0,044	1,067 ± 0,519	0,921	0,953	0,006
X40Z40	1,062 ± 0,052	-0,872 ± 0,539	0,942	1,014	0,002
X55Z10	0,863 ± 0,056	0,761 ± 0,676	0,901	0,562	0,013
X55Z20	0,872 ± 0,065	0,832 ± 0,623	0,898	0,568	0,016
X55Z30	0,870 ± 0,056	0,685 ± 0,565	0,903	0,564	0,014
X55Z40	0,846 ± 0,082	0,938 ± 0,758	0,853	0,699	0,033

β_0 -Coeficiente angular da reta; β_1 -Coeficiente linear da reta; RMSE- Raiz quadrada do quadrado médio do erro; R- Distância de instalação da sonda no solo; Z-Profundidade de instalação da sonda no solo.

Na Figura 10, é possível perceber que quando o balanço de água no solo foi realizado com uma única sonda, as posições do solo de onde foram coletados dados de conteúdo de água no solo para uma melhor estimativa de ETc estavam localizadas dentro do bulbo molhado e em regiões onde percebeu-se haver maiores intensidades no fluxo de extração de água e maior volume de raízes. Por outro lado, os dados de conteúdo de água no solo coletados fora do bulbo molhado e em regiões do solo onde a concentração de raízes e fluxo de extração de água é baixo os valores de ETc obtidos pelo balanço de água no solo diferenciaram-se daqueles obtidos em lisímetro.

As maiores extrações ocorrendo próximo ao emissor devem-se à característica de aplicação de água do sistema de gotejamento, que é um ponto fonte de emissão de água ao solo. Esse comportamento também foi observado por Nascimento et al. (2019), os autores observaram a variabilidade espaço temporal de extração de água pelo meloeiro irrigado por gotejamento e notaram que a extração ocorre com mais intensidade próximo ao gotejador e indicaram essa região como zona efetiva do sistema radicular.

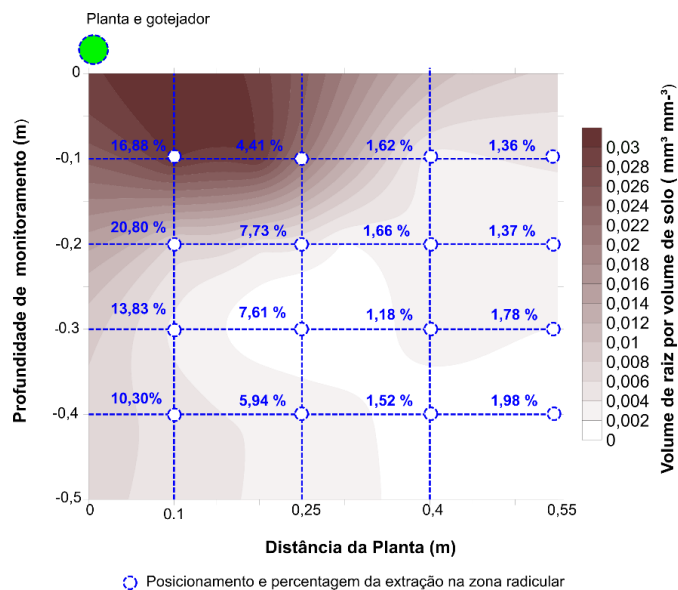


Figura 10- Distribuição do volume de raízes em relação ao volume de solo no perfil de monitoramento e a percentagem de extração de água na zona radicular por ponto de monitoramento.

E perceptível que a distribuição de água no solo pelo emissor tem grande influência sob a determinação do ponto onde se deve monitorar a variação de armazenagem, implicando que, se sensores de água no solo forem instalados muito próximos do emissor as grandes variações de conteúdo de água no solo ao longo do tempo, pode levar a valores de ET_c superestimados. A maior intensidade de extração de água nas regiões onde há pontos de maior disponibilidade de água, também foi observada por Koumanov et al. (2006) que verificou esse comportamento no sistema radicular de amendoeiras irrigadas por microaspersão com uma vazão média de $41,7 \text{ l h}^{-1}$ com um raio molhado de aproximadamente 2 m.

Silva et al. (2018) utilizou a variabilidade da extração de água na zona radicular da bananeira sob irrigação por microaspersão, porém ao contrário do que foi aqui observado, os autores não encontraram relação definida entre as regiões no solo que recebem mais água e a intensidade de extração. Com isso viram que o ponto de monitoramento pode variar ao longo do desenvolvimento da cultura.

4 CONCLUSÃO

Os valores de evapotranspiração do maracujazeiro (ET_c) obtidos pelo balanço de água no solo com dados de conteúdo de água no solo (θ) obtidos a

partir de espaços uni e bidimensional são semelhantes aos valores de ET_c obtidos por lisimetria. Isso demonstra que é possível usar sensores de água do solo para quantificar ET_c em um sistema de gotejamento com frente de umedecimento 2D / 3D. Para isso, a seleção de sensores de alta qualidade (como o TDR) e sua correta calibração devem preceder os procedimentos de campo. Além disso, no caso do balanço de água no solo, a seleção correta dos tempos iniciais e finais para calcular a variação de armazenagem deve ser realizada com cuidado, por exemplo, logo antes de um evento de irrigação para imediatamente antes do evento subsequente, o que significa o processo de redistribuição após o evento de irrigação ocorre e há menos variabilidade espacial em θ naquele momento.

Na determinação do balanço de água no solo os sensores devem ser instalados preferencialmente na zona do bulbo molhado próximos ao gotejador. O estudo revela que, quando os sensores podem ser distribuídos em 2D / 3D, o sistema de irrigação ou seção pode ser acionado usando o sinal de um único sensor que representa a extração média de todo o perfil monitorado. No caso específico deste experimento, por exemplo, verificou-se que a instalação de uma única sonda entre 0 e 0,3 m de profundidade e a 0,10 m de distância do gotejador, permitiu a obtenção de valores de ET_c próximos aos obtidos por lisímetro de pesagem.

Os resultados deste estudo representam mais um passo na busca pelo desenvolvimento de critérios gerais para o posicionamento do SAS, o que é particularmente útil e necessário para tornar o manejo da irrigação por gotejamento mais preciso. No entanto, considerando que o estudo foi realizado em condições altamente controladas, com uma cultura específica, cultivada em ambiente protegido, com um critério de manejo de irrigação delimitado, estudos futuros são necessários para a implementação de critérios generalistas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BADR, A.E.; ABUARAB, M.E. Soil moisture distribution patterns under surface and subsurface drip irrigation systems in sandy soil using neutron scattering technique. *Irrigation science*, v. 31, n. 3, p. 317-332, 2013.

BARROWCLOUGH, D.E.; PETERSON C.A.; STEUDLE, E. (2000). Radial hydraulic conductivity along developing onion roots. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 344, p. 547-557, 2000.

COELHO, E.F.; OR, D. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 5, p. 1331-1341, 1997.

DINGRE, S. K.; GORANTIWAR, S. D. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 106042, 2020.

DRAYE, X.; KIM, Y.; LOBET, G.; JAVAUX, M. Model-assisted integration of physiological and environmental constraints affecting the dynamic and spatial patterns of root water uptake from soils. **Journal of experimental botany**, v. 61, n. 8, p. 2145-2155, 2010.

GAO, Z., ZHU, Y., LIU, C., QIAN, H., CAO, W., NI, J. Design and test of a soil profile moisture sensor based on sensitive soil layers. **Sensors**, v. 18, n. 5, p. 1648, 2018.

GUNDUZ, M., KORKMAZ, N., ASIK, S., UNAL, H. B., & AVCI, M. U. H. A. M. M. E. D. Effects of various irrigation regimes on soil water balance, yield, and fruit quality of drip-irrigated peach trees. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 137, n. 7, p. 426-434, 2011.

KISEKKA, I.; KANDELOUS, M. M.; SANDEN, B.; HOPMANS, J. W. Uncertainties in leaching assessment in micro-irrigated fields using water balance approach. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 107-115, 2019.

KOUMANOV, K. S.; HOPMANS, J. W.; SCHWANKL, L. W. Spatial and temporal distribution of root water uptake of an almond tree under microsprinkler irrigation. **Irrigation Science**, v. 24, n. 4, p. 267, 2006.

KROES, J. G.; VAN DAM, J. C.; BARTHOLOMEUS, R. P.; GROENENDIJK, P.; HEINEN, M.; HENDRIKS, R. F. A.; VAN WALSUM, P. E. V. **SWAP version 4**. Wageningen Environmental Research, 2017.

LI, Z.; LIU, H., ZHAO, W., YANG, Q., YANG, R., LIU, J. Estimation of evapotranspiration and other soil water budget components in an irrigated agricultural field of a desert oasis, using soil moisture measurements. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 1-17, 2018.

LUCAS, A. A. T., FRIZZONE, J. A., & COELHO FILHO, M. A. Características da distribuição radicular de maracujazeiro sob fertirrigação. **Irriga**, v. 17, n. 2, p. 245-250, 2012.

MAYER, D. G.; STUART, M. A.; SWAIN, A. J. Regression of real-world data on model output: an appropriate overall test of validity. **Agricultural Systems**, v. 45, n. 1, p. 93-104, 1994.

MMOLAWA, K.; OR, D. Water and solute dynamics under a drip-irrigated crop: experiments and analytical model. **Transactions of the ASAE**, v. 43, n. 6, p. 1597, 2000.

NASCIMENTO, F. A. L. D.; SILVA, A. J. P. D.; CAMPOS, A. R. F. Soil water storage variability in a three-dimensional analysis in the root zone of irrigated melon. **Bragantia**, v. 78, p. 587-595, 2019.

PHOGAT, V.; PITT, T.; COX, J. W.; ŠIMŮNEK, J.; SKEWES, M. A. Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 70-82, 2018.

PALOMO, M. J.; MORENO, F.; FERNÁNDEZ, J. E.; DIAZ-ESPEJO, A.; & GIRÓN, I. F. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. **Agricultural water management**, v. 55, n. 1, p. 15-35, 2002.

RAMADAN, K. M.; OATES, M. J.; MARTINEZ, J. M.M.; RUIZ-CANALES, A.R. Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 148, p. 148-159, 2018.

SILVA, A. J. P.; VAN LIER, Q. D. J.; & COELHO, E. F. Time Stable Representative Position determination as affected by the considered part of an irrigation cycle. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 281-287, 2019.

SILVA, A. J. P. D.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; SOUZA, J. L. D. Water extraction and implications on soil moisture sensor placement in the root zone of banana. **Scientia Agricola**, v. 75, p. 95-101, 2018.

SILVA, A. J. P. D.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A. Water extraction variability in the banana root zone affects the reliability of water balance. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 1-10, 2015.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; & ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 7, p. vzj2016. 04.0033, 2016.

SOULIS, K. X., ELMALOGLOU, S., & DERCAS, N. Effect of irrigation management on pasture yield and nitrogen losses. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 60-69, 2019.

SOULIS, K. X.; ELMALOGLOU, S. Optimum soil water content sensors placement in drip irrigation scheduling systems: concept of time stable representative positions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, n. 11, p. 04016054, 2016.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; HALDER, D. Effective crop evapotranspiration measurement using time-domain reflectometry technique in a sub-humid region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3, p. 1211-1225, 2017.

STEUDLE, E.; FRENSCH, J. Water transport in plants: role of the apoplast. **Plant and soil**, v. 187, n. 1, p. 67-79, 1996.

SUBBAIAH, R. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 31, n. 3, p. 225-258, 2013.

TEDESCHI, L. O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural systems**, v. 89, n. 2-3, p. 225-247, 2006.

VIDANA, D.N.G.; BISWAS, A.; STRACHAN, I. B. Actively heated fiber optics method to monitor three-dimensional wetting patterns under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 210, p. 243-251, 2018.

WARRICK, A. W. Solution to the one-dimensional linear moisture flow equation with water extraction. **Soil Science Society of America Journal**, v. 38, n. 4, p. 573-576, 1974.

WATT, M.; MAGEE, L. J.; & MCCULLY, M. E. Types, structure and potential for axial water flow in the deepest roots of field-grown cereals. **New Phytologist**, v. 178, n. 1, p. 135-146, 2008.

XU, Z.; ZHOU, W.; ZHANG, H.; SHEN, M.; LIU, Y.; CAI, D.; LI, B. Flat thin mm-sized soil moisture sensor (MSMS) fabricated by gold compact discs etching for real-time in situ profiling. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 255, p. 1166-1172, 2018.

ZHAO, W.; LI, J.; YANG, R.; & LI, Y. Determining placement criteria of moisture sensors through temporal stability analysis of soil water contents for a variable rate irrigation system. **Precision agriculture**, v. 19, n. 4, p. 648-665, 2018.

CAPÍTULO 2

SENSORES E FREQUÊNCIAS DE OBTENÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: IMPLICAÇÕES NA SIMULAÇÃO AGRO-HIDROLÓGICA E MANEJO DA IRRIGAÇÃO

SENSORS AND FREQUENCIES OF SOIL WATER CONTENT MEASUREMENT: IMPLICATIONS ON AGRO-HYDROLOGICAL SIMULATIONS AND ON IRRIGATION MANAGEMENT

Autor: Francisco Airdesson Lima do Nascimento

Orientador: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

RESUMO: Diferenças nos princípios dos sensores de água no solo (SAS) e a frequência de coleta dos dados de conteúdo de água no solo (CAS) podem inferir distinção na determinação das propriedades hidráulicas do solo (PHS) por modelagem inversa, no uso de modelos agro-hidrológicos e no manejo de irrigação. O trabalho tem como objetivo: (I) Analisar se o tipo de sensor e a frequência de obtenção de dados de conteúdo de água no solo utilizados na modelagem inversa afetam os resultados das propriedades hidráulicas do solo, (II) se variações nos protocolos de obtenção de CAS afetam os resultados das propriedades hidráulicas do solo (PHS) ao ponto de causar efeito na modelagem agro-hidrológicas pelo SWAP e no manejo da irrigação via solo do maracujazeiro. (III) apontar estratégias para um correto manejo de irrigação baseado em PHS obtidas por modelagem inversa. As PHS de um solo franco-arenoso foram determinadas em laboratório, com base no equilíbrio estático e por modelagem inversa (MI) de condições transientes. Utilizou-se o Hydrus 1-D, com dados de CAS oriundos de sondas de reflectometria no domínio do tempo (Time-Domain-Reflectometry – TDR) e sondas capacitivas modelo GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) obtidos em frequências de 1, 3, 6, 12 e 24h. Os resultados de PHS foram aplicados à modelagem de ETC e CAS com uso do modelo agro-hidrológico SWAP. O tipo de sensor e a frequência de coleta dos dados de CAS interferiram nos resultados de PHS obtidos por modelagem inversa com implicações na modelagem agro-hidrológica e no manejo da irrigação via sensoriamento da água no solo. Observou-se diferenças nas curvas de retenção de água no solo obtida pelo método laboratorial e modelagem inversa, porém, essas diferenças não interferiram nas simulações de ETC do maracujazeiro feitas no SWAP para as condições de irrigação localizada em alta frequência. Os resultados deste estudo alertam para diferenças que podem ocorrer em valores de CAS quando estes originam-se de potenciais matriciais a partir de curvas de retenção originadas por protocolos de obtenção distintos. Isto é especialmente importante quando se trata de potenciais matriciais críticos superiores e inferiores utilizados como referência para o momento de desligar e ligar um sistema ou setor de irrigação. Quando se usar as sondas GS1 em modelagem inversa recomenda-se utilizar a coleta de CAS com intervalos de 1 hora, já as sondas de TDR performam bem com as frequências de coletada de CAS entre 1 a 12 horas.

Palavras chave: Modelagem inversa, propriedades hidráulicas do solo, irrigação por gotejamento

SENSORES E FREQUÊNCIAS DE OBTENÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: IMPLICAÇÕES NA SIMULAÇÃO AGRO-HIDROLÓGICA E MANEJO DA IRRIGAÇÃO

Author : Francisco Airdesson Lima do Nascimento

Adviser: Prof. Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva

ABSTRACT: Differences on the principles used by soil water content (SWC) sensors and the frequency of SWC measurements may cause differences on the determination of soil hydraulic properties (SHP) by inverse modelling, on the use of agro-hydrological models and on the irrigation management. This work has the following objectives: (I) to analyze if the type of sensor and the frequency of SWC measurement used in inverse modelling affect the results regarding SHP; (II) to assess if variations on the SWC measurement protocol affect the results of SHP to the point of causing effects on the agro-hydrological modelling through SWAP model and on the passion fruit irrigation management based on SWC; (III) point out strategies for the correct irrigation management based on SHP obtained through inverse modelling. The SHP of a sandy loam soil were determined in laboratory, through static equilibrium and by inverse modelling (IM) of transient conditions. The Hydrus 1-D software was used, with SWC data from time-domain-reflectometry probes (TDR probes) and capacitive probes model GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA) obtained at frequencies of 1, 3, 6, 12 and 24 h. The results regarding SHP were applied to the modelling of crop evapotranspiration (ET_c) and SWC with the use of SWAP agro-hydrological model. The type of sensor and the frequency of SWC data measurements interfered in the results regarding SHP obtained through inverse modelling, with implications on the agro-hydrological modelling and on the irrigation management through soil water remote sensing. Differences were observed on the soil water retention curves obtained through laboratorial method and inverse modelling, however, these differences did not affect the passion fruit ET_c simulations performed by SWAP model for the conditions of high-frequency localized irrigation. The results of this study alert for the differences that may occur in SWC values when those are obtained from matric potential through soil water retention curves adjusted by different protocols. This is specially important for higher and lower critical matric potentials used as reference for the moment to turn on and off a irrigation system or section. When using GS1 probes in inverse modelling, it is recommended to use a frequency of SWC measurements of 1 hour. Yet, the measurements by TDR probes perform well with frequency of measurements between 1 and 12 hours.

KEY WORDS: Inverse modeling, soil hydraulic properties, drip irrigation

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de um solo em armazenar água está relacionada às suas propriedades hidráulicas, isto é, as propriedades de retenção, conteúdo de água no solo (CAS) como função do potencial matricial (h) e condutividade hidráulica (k) como função de h . A determinação das propriedades hidráulicas do solo é um ponto chave para o correto manejo da irrigação e uso de modelos agro-hidrologicos tais como Hydrus e SWAP (SIMUNEK et al., 2016; KROES et al., 2017).

Na determinação das propriedades hidráulicas do solo (PHS), o conteúdo de água no solo é uma grandeza muito importante e pode ser entendida como a razão entre a massa da água e a massa do solo (Umidade a base de massa ou gravimétrica - U) ou o volume de água pelo volume de solo (Umidade volumétrica - θ). Essa grandeza do solo, pode ser determinada em campo e o método considerado como padrão é o gravimétrico (REYNOLDS, 1970; SCHMUGGE et al., 1980).

Os valores de conteúdo de água no solo podem ser determinados de maneira indireta por meio de instrumentos baseados em diversos princípios, haja vista que a quantidade de água no solo altera outras propriedades físicas, como a moderação de nêutrons rápidos (sonda de moderação de nêutrons), variações na capacitância de instrumentos (sensores capacitivos), constante dielétrica aparente (sensores de TDR e FDR), potencial de água no solo (tesiómetros e tensímetros) etc (SUSHA LEKSHMI et al., 2014).

As sondas de TDR são consideradas instrumentos precisos quando bem calibrados para o solo em que se deseja monitorar o conteúdo de água no solo. Essas sondas medem a constante dielétrica aparente do solo (K_a). Para medidas de conteúdo de água no solo com TDR é necessário realizar uma calibração, que é uma função que correlaciona $K_a \times \theta$. A boa precisão desse instrumento na medida de conteúdo de água no solo faz com que o seu uso seja muito difundido em pesquisas de movimento de água no solo e manejo de irrigação (CALAMITA et al., 2012; FAN et al., 2015; CANONE et al., 2016; JANIK et al., 2021).

Embora a TDR consiga apresentar boa precisão na estimativa de conteúdo de água no solo, esses instrumentos apresentam um custo alto de

implantação. Assim, uma alternativa são os sensores capacitivos, que podem ser construídos com custo baixo e com plataformas embarcadas de fácil acesso (OATES et al., 2017; NAGAHAGE et al., 2019; PLACIDI et al., 2020). Os sensores capacitivos são compostos por um osciloscópio que emitem ondas quadradas, referente a carga ou descarga dos seus capacitores, essa frequência varia conforme permissividade dielétrica do solo em torno das suas hastes, que é alterada com a quantidade de água no meio. Por esse princípio é possível relacionar o conteúdo de água no solo, obtendo dados com boa precisão, tanto em campo quanto em laboratório (VAZ et al., 2013; TERUEL et al., 2019).

A precisão dos dados do conteúdo de água no solo obtida e relatada por Ferrarezi et al. (2020), que avaliaram 11 sensores comerciais em diferentes solos arenosos na Florida, os autores indicam que para os solos em questão os sensores que tiveram menores erros em relação ao método gravimétrico foram os sensores de TDR310S, TDR315L (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) e os sensores capacitivos GS1 e 5TE (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA).

O conteúdo de água no solo quando relacionado com o potencial matricial da água no solo permite a obtenção de uma representação gráfica conhecida como curva de retenção de água no solo (CRAS). O método tradicional de determinação da CRAS é baseado na estabilidade do equilíbrio hidro estático entre uma amostra de solo e um meio poroso a certa pressão. Nos laboratórios de física do solo, vários equipamentos como caixa de areia, mesas de tensão e câmaras de pressão são utilizados para determinar a relação entre o conteúdo de água na amostra e a tensão que correlaciona naquele ponto (RICHARDS, 1948; BITELLI & FLURI, 2009).

Outra característica importante do solo é a condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$. Esse parâmetro não é mensurado pela, porém existem vários modelos que descrevem de maneira analítica o comportamento de $K(\theta)$, podendo citar Childs & Collins-George (1950), Brooks & Corey (1964), Campbell (1974), Van Genuchten-Mualem (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980), Durner (1994), Groenevelt & Grant (2004). Esses modelos têm em sua base matemática o uso da condutividade hidráulica saturada K_s , esse parâmetro pode

ser determinado em laboratório por meio de uma amostra indeformada em que se mantém a saturação com o uso de permeâmetros de carga.

Os métodos convencionais apesar da sua aceitação, apresentam uma dificuldade que é o custo laboratorial e muitas vezes o acesso aos laboratórios de análise, um método alternativo é a modelagem inversa, que parte dos valores conteúdo de água no solo e a medição continuada da evaporação do solo, para se determinar os valores da curva de retenção de água no solo e de K_s , podendo ser aplicada diretamente em campo ou em laboratórios, usando um aparato mais simples que o método convencional.

O método de modelagem inversa foi preconizado por Gardner & Miklich (1962), em que os autores impuseram taxas de fluxos constantes e mediram a variação do potencial da água com dois tensiômetros, o método foi melhorado por Wind, (1968) que introduziu o método matemático de iteração gráfica, para obtenção da curva de retenção de água no solo e posteriormente os valores de K_s e $K(\theta)$. O método foi automatizado por Wendroth et al., (1993).

Simunek et al. (1998), avaliou o potencial do método utilizando o pressuposto por Wind, (1968), Wendroth et al. (1993), utilizando como ferramenta computacional o Hidrus 1D. Essas ferramentas possibilitaram um número crescente de trabalhos científicos, que utilizaram a modelagem inversa para determinar os parâmetros hidráulicos do solo (RITTER et al., 2003; DEXTER et al., 2012; PETERS et al., 2015; LI et al., 2017; PINHEIRO et al., 2019; VAN LIER et al., 2019; SILVA et al., 2020).

Um fato não observado pelos autores é o tipo de sensores de água no solo, a frequência da coleta de dados de conteúdo de água no solo, por exemplo (SIMUNEK et al., 1998; PETERS et al., 2015) utilizaram um par de tensiômetro para se conhecer a variação de conteúdo de água no solo ao longo do ensaio, porém os autores não indicam a frequência da coleta desses dados, Ritter et al. (2003) e Silva et al. (2020), utilizaram sondas de TDR com coleta de dados a cada hora, para realizar o ensaio de evaporação dessa forma os autores necessitaram de coleta automática de dados, aumentando, assim, ainda mais o custo do ensaio. Pinheiro et al. (2019) e Jon van Lier et al. (2019), utilizaram dados de conteúdo de água no solo coletados por meio da técnica de atenuação

de raios gama a cada 24 horas. Posto isto acreditamos que diferenças nos princípios dos sensores de água no solo SAS e a frequência de coleta dos dados de conteúdo de água no solo e evaporação, podem inferir distinção nos valores das propriedades hidráulicas do solo obtidas por MI, e inferir variações nos resultados do manejo de irrigação, balanço de água no solo e modelagem agro-hidrológica. Diante do exposto, o trabalho tem como objetivo: (I) Analisar se o tipo de sensor e a frequência de obtenção de dados de conteúdo de água no solo utilizados na modelagem inversa afetam os resultados das propriedades hidráulicas do solo, (II) se variações nos protocolos de obtenção de conteúdo de água no solo afetam os resultados das propriedades hidráulicas do solo (PHS) ao ponto de causar efeito na modelagem agro-hidrológicas pelo SWAP e no manejo da irrigação via solo do maracujazeiro. (III) apontar estratégias para um correto manejo de irrigação baseado em PHS obtidas por modelagem inversa.

2- MATERIAL E MÉTODOS

2.1- Características gerais do experimento em campo

O experimento foi conduzido em casa de vegetação nas dependências da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) em Cruz das Almas, Brasil, (12° 48`S, 39° 06`W). A precipitação e temperatura média anual do local é 1200 mm e 24 °C. No interior da casa de vegetação foram montadas 36 lisímetros de drenagem, construídos em fibra de vidro com área de 1,21 m² (0,9 m de profundidade; 1,1 m de largura e 1,1m de comprimento) as quais foram utilizadas para cultivo do maracujazeiro (*Passiflora edulis* Sims). Os lisímetros foram equipados com um sistema de drenagem composto por três tubos de PVC de 0,05 m de diâmetro interno, com furos de 0,0005 m de diâmetro, funcionando como drenos laterais que descarregavam o volume a ser drenado em um sistema coletor de água. A 0,15 m acima dos drenos foi colocado uma camada de brita (diâmetro específico de 10 mm), e uma camada de 0,15 m de areia lavada. Entre os lisímetros, um foi equipado com 32 sensores de TDR e uma plataforma de pesagem. O solo utilizado para preenchimento dos lisímetros é classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso, com 68 % de areia e 12 % de argila, textura franco-arenoso.

As propriedades hidráulicas do solo foram determinadas antes do plantio por meio de modelagem inversa. Para isso o solo do lisímetro foi saturado. Logo após a saturação foi monitorado continuamente as variações do conteúdo de água no solo e de evaporação com as variações de massa no lisímetro. Ao fim os dados de evaporação e conteúdo de água no solo foram levados ao Hydrus 1D (SIMUNEK et al., 2016) e foi gerado os valores observados na tabela 1

Tabela 1- Propriedades hidráulicas do solo do experimento.

θ_s (m ³ m ⁻³)	θ_r (m ³ m ⁻³)	α (m ⁻¹)	n (-)	λ (-)	Ks (m dia ⁻¹)
0,472	0,022	5,5	1,52	0,008	0,072

A variedade de maracujazeiro cultivada foi o “Gigante amarelo”. O espaçamento entre plantas adotado foi de 2,0 x 1,5 m e o sistema de tutoramento que se adotou foi o do tipo “espaldeira vertical.

O método de irrigação utilizado foi o de microirrigação, composto por um sistema de gotejamento. As linhas laterais foram localizadas à 0,05 m do caule da planta, com dois emissores por planta, espaçados entre si em 0,15 m. Tais emissores eram do tipo autocompensado, com vazão de 2 L h⁻¹.

O intervalo entre irrigações adotados foi de 2 dias. Em cada irrigação, o volume de água aplicado foi o necessário para retornar o conteúdo de água no solo para próximo da capacidade de campo, equivalente o potencial mátrico de -10 KPa (1 mca). Para isso, dados do conteúdo de água no solo foram obtidos com sondas de TDR instaladas no interior do lisímetro. De posse desses dados a irrigação foi calculada conforme equação 1:

$$IRN_r = \sum_{Z=0,10\text{ m}}^{Z=0,40\text{ m}} (\theta_{cc} - \theta_{atual}) * Z \quad (1)$$

em que: IRN_r - Irrigação real necessária calculada para as sondas instaladas a 0,1 e 0,25m da planta (mm); θ_{cc} -conteúdo de água no solo referente a capacidade de campo (cm³ cm⁻³); θ_{atual} - conteúdo de água no solo antes de cada irrigação (cm³ cm⁻³); Z- Profundidade (500 mm). Z-0,10 m é o posicionamento da sonda de TDR da sonda superior e Z-0,40 m é o posicionamento da sonda inferior de TDR.

A irrigação real necessária aplicada nos intervalos de irrigação foi obtida com a média entre os valores calculados para as distâncias 0,1 m e 0,25 m da planta, conforme a equação 2.

$$IRN_{média} = \frac{(IRN_{0,10\ m} + IRN_{0,25\ m})}{Nr} \quad (2)$$

em que: Nr- Número de sondas (8) utilizadas no cálculo da lâmina de irrigação.

A irrigação foi ajustada para as condições da área molhada pelos emissores com o uso da equação 3.

$$ITN = \frac{[IRN\ média * (\pi * R^2)]}{Ef} \quad (3)$$

em que: ITN - Irrigação total necessária (Litros); R- Raio molhado do bulbo molhado (m) determinada, conforme descrito no tópico a seguir; Eficiência hidráulica de irrigação 95%.

A área molhada encontrada para o manejo de irrigação foi de 0,3848 m², tendo um raio de distribuição máximo de 0,35 m.

2.2 Instrumentação utilizada

2.2.1- Sensores do conteúdo de água no solo

Para o monitoramento do conteúdo de água no solo foram utilizadas sondas de reflectometria no domínio do tempo (Time-Domain-Reflectometry – TDR) acopladas a quatro multiplexadores SDMSX 50 e um reflectômetro modelo TDR 100 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA). As sondas de TDR utilizadas apresentavam as seguintes características: três hastes de aço inoxidável com comprimento fora da resina de 0,1m e espaçadas entre si por 0,017 m; cabos coaxiais de 50 ohms; comprimento da camada de resina de poliéster no início das hastes de 0,05 m. As sondas foram calibradas em laboratório.

Também foi utilizado para monitoramento, sondas capacitivas modelo GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA), o instrumento é composto por: um corpo plástico e o circuito eletrônico resinado, duas hastes de aço Inoxidável de 0,06 m de comprimento.

Para calibração das sondas TDR e GS1, foram utilizados três tubos PVC de 0.075 m de diâmetros e 0,20 m de altura. Na parte inferior dos tubos, foram

colocadas duas malhas, com a finalidade de apenas permitir a passagem de água para o exterior do tubo e não perder partículas de solo. Os tubos foram preenchidos com solo da área experimental, seco ao ar e destorroado, mantendo a densidade próxima de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$. Os sensores foram posicionados no centro dos tubos com solo, até cobrirem completamente suas hastes. Os tubos com solo e sensores foram imersos por 24 horas em um recipiente com água visando a saturação do meio. Após a saturação realizou-se uma série de leituras da massa (kg) do conjunto tubo – sonda – solo – tela, para obtenção do conteúdo da água no solo conforme a equação 4:

$$\theta = \left(\frac{M1 - M2}{M2 - M3} \right) * \frac{ds}{da} \quad (4)$$

Em que: θ é o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); M1 é a massa do conjunto tubo, solo úmido, sonda e tela (kg); M2 é a massa do conjunto tubo, solo seco, sonda e tela (kg); M3 é a massa do tubo, sonda e tela (kg); ds é a densidade do solo ($1,3 \text{ kg dm}^{-3}$); da é a densidade da água ($1,0 \text{ kg dm}^{-3}$).

Cada valor de θ foi associado a um correspondente valor ka (obtido pelo reflectómetro) e T obtida pela sonda GS1 para obtenção o das equações 5 e 6:

$$\begin{aligned} \theta_{TDR} &= 5,222 * 10^{-6} * Ka^3 + 2 * 10^{-4} * Ka^2 + 6,4 * 10^{-3} * Ka + 0,0405 R^2 \\ &= 99\% \quad (5) \end{aligned}$$

$$\theta_{Decagon} = 5 * 10^{-10} * T^3 + 2 * 10^{-6} * T^2 + 0,0039 * T + 2,154 R = 99\% \quad (6)$$

Em que: θ_{TDR} - conteúdo de água no solo obtido pela TDR ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); $\theta_{Decagon}$ - conteúdo de água no solo obtido pela sonda capacitiva da Decagon ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); Ka- Constante dielétrica aparente lida pela TDR; T-leitura de tensão elétrica lida no solo pela sonda da Decagon (mV).

2.2.2 -Lisímetro de pesagem

Para medida da evapotranspiração do maracujazeiro (ETc) foi montado um lisímetro de pesagem utilizando-se uma plataforma de pesagem com a capacidade de 2000 kg com aproximação de 0,10 kg. O lisímetro foi equipado

com um sistema de drenagem composto por três tubos de PVC de 0,05 m de diâmetro interno, perfurados funcionando como drenos laterais que descarregavam o volume a ser drenado em um sistema coletor de água. A 0,15 m acima dos drenos foi colocada uma camada de brita (diâmetro específico de 10 mm), e uma camada de 0,15 m de areia lavada.

O conteúdo de água no solo no interior do lisímetro foi monitorado por meio de 8 sensores de TDR conectados a um multiplexador SDMSX 50 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA), instaladas a 0,10m e 0,25 m de distância da planta nas profundidades de 0,10 m, 0,20 m, 0,30 m e 0,40 m de profundidade.

A plataforma de pesagem foi calibrada tomando como base a associação de sinal emitido em milivolt por volt ($mV V^{-1}$) com a massa (kg) conhecida aplicada na plataforma de pesagem. As variações de sinais emitidas pela plataforma devido as alterações de massa aplicadas e o conteúdo de água no solo, foram armazenadas por um datalogger CR800 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA). A função de correlação entre a massa e o sinal foi obtida por uma equação linear:

$$\text{massa do lisímetro (Kg)} = 874,3 * (\text{sinal}) - 1336,3 \quad R^2 = 0,999 \quad (7)$$

Para medir a evaporação foi montado uma segunda plataforma de pesagem com a capacidade máxima de 100 kg, o procedimento de calibração foi o mesmo adotado pela plataforma de pesagem utilizada no lisímetro e a função de calibração pode ser observada na equação 8.

$$\text{Massa da plataforma (kg)} = 74,763 * (\text{sinal}) - 9,154 \quad R^2 = 0,998 \quad (8)$$

Em que: - é a massa registrada na plataforma de pesagem Kg; sinal- é o sinal registrado pela plataforma de pesagem ($mV V^{-1}$).

2.2.3 Estação Meteorológica

Para o monitoramento das variáveis climatológicas no interior da casa de vegetação foi utilizado uma estação automática, que contava com um piranômetro LP02-L12 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA.) para

realizar as medidas de radiação, e um termo-higrômetro HMP45C-L12 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) para as medidas de temperatura e umidade relativa do ar. Os sensores foram *instalados* a dois metros de altura do solo, no centro da casa de vegetação. As leituras foram realizadas a cada trinta segundos e os dados foram armazenados em um datalogger CR1000 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) a cada quinze minutos. A velocidade do vento não foi medida, pois a circulação de ar no interior da casa de vegetação é muito baixa então foi adotado o valor de $0,5 \text{ m s}^{-1}$ conforme o recomendado por Allen et al. (1998).

2.4 Modelagem Inversa (MI)

Para realizar as determinações dos parâmetros hidráulicos do solo foi utilizado o modelo HYDRUS – 1D, (Simunek et al.,2016). Para isso é realizado a resolução da equação 9 de Richards (RICHARDS, 1931) para estimativa do fluxo de água no solo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} \right) - 1 \right] \quad (9)$$

em que: h - e o potencial de água no solo (mca); θ - é o conteúdo de água presente no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); t - é o tempo (horas); z - é a profundidade de controle(m); $K(\theta)$ - é a condutividade hidráulica não saturada do solo (m h^{-1}).

No Hydrus as propriedades hidráulicas do solo, i.e θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ são determinadas por meio dos modelos de Van Genuchten- Mualem (MUALEM, 1976; van GENUCHTEN, 1980):

$$\begin{cases} \theta(h) = \theta_s & h \geq 0 \\ \theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right]^{(1-\frac{1}{n})} & h < 0 \end{cases} \quad (10)$$

e a condutividade hidráulica não saturada descrita pela equação. 11:

$$K(\theta) = K_s S_e^\lambda \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{1-\frac{1}{n}} \right]^2 \quad (11)$$

em que: S_e é a saturação efetiva, definida como $S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$; θ_r e θ_s o conteúdo de água residual e saturado ($m^3 m^{-3}$), respectivamente; h é pressão (mca), $K(\theta)$ e K_s a condutividade hidráulica do solo e condutividade hidráulica saturada do solo ($m h^{-1}$), α (m^{-1}), n e λ são parâmetros empíricos.

Para determinar os parâmetros hidráulicos, o algoritmo do modelo propõe um problema de programação não linear, tendo como função objetiva a equação 12.

$$\Phi(\theta, \beta) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} [\theta_{\text{medido},j}(z_i, t_i) - \theta_{\text{estimado},j}(z_i, t_i, \beta)]^2 \quad (12)$$

em que, o lado direito da equação 6 representa o resíduo entre o conteúdo de água no solo observado no tempo t_i para j th medidas em z_i , e os correspondentes valores do conteúdo de água no solo estimados (θ_{estimado}) utilizando os parâmetros hidráulicos do solo otimizados em β (i.e., θ_r , θ_s , α , n , K_s e λ); m é o número de diferentes locais de medidas de θ ; e n o número de medidas realizadas em um m . A minimização da função objetiva Φ é realizada utilizando o método de minimização não-linear de Levenberg-Marquardt.

2.4.1- Características do ensaio de evaporação para modelagem inversa

Para determinação dos parâmetros hidráulicos do solo por modelagem inversa, foi montado um ensaio de evaporação seguindo o proposto por Wind (1968) com base nos transiente hidráulico.

Para montagem do ensaio foi utilizado um tubo de PVC medindo 0,55 m de altura com 0,2 m de diâmetro. O tubo foi preenchido com um solo classificado quanto a sua textura como franco arenoso, o qual apresentava 68 % de areia e 12 % de argila, o solo foi acomodado para atingir uma densidade de $1,3 \text{ kg dm}^{-3}$.

O conteúdo de água no solo foi monitorado de duas formas: (i) utilizando sensores de TDR (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA); (ii) sensores capacitivos GS1 (Decagon Devices, Inc., Hopkins CT, Pullman, USA). Para cada forma de monitoramento da umidade do solo, os sensores foram distribuídos nas profundidades de 0,05, 0,15, 0,25, 0,35 e 0,45 m (Figura 1).

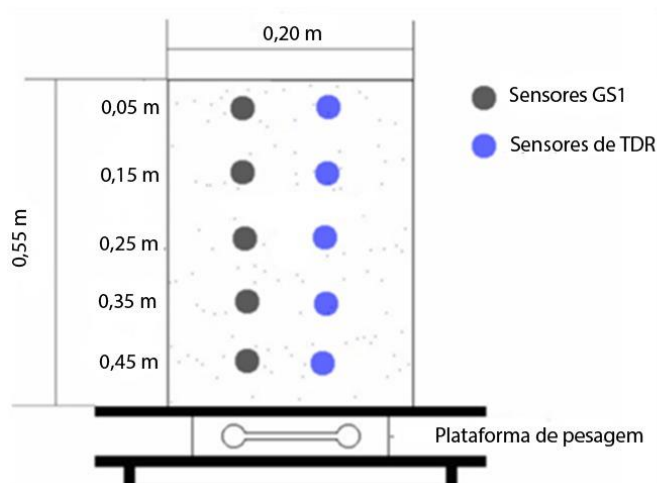


Figura 1. Esquema do corte seccional do monólito de solo para avaliação da evaporação.

O solo presente no interior do cilindro foi saturado pela parte superior, sendo a água aplicado sobre um bloco de esponja, visando uma distribuição uniforme. Após a saturação, o cilindro foi posicionado sobre plataforma de pesagem. Todo conjunto foi localizado em área de alta incidência de radiação solar no interior da casa de vegetação. A parte superior do cilindro permaneceu aberta e sua extremidade inferior fechada, tendo com isso o fluxo de água ocorrendo somente devido à evaporação.

Durante o processo de evaporação, monitorou-se de forma contínua e automática as variações temporais do conteúdo de água no solo e de massa na plataforma de pesagem. Os registros desses dados ocorreram com frequência de 30 minutos. Os dados foram armazenados em um datalogger modelo CR800 (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA).

A coleta dos dados foi iniciada imediatamente após a saturação e foi finalizada quando os valores de massa registrados apresentassem uma variação de 0,01 kg.

2.5- Cenários para aplicação da modelagem inversa. (MI)

Os dados do conteúdo de água no solo, necessários para realização da MI, foram obtidos com os sensores de TDR e GS1. As frequências de coleta de dados adotada foram 1,3,6,12,24h. Com isso, foi realizado a modelagem inversa para 10 cenários (2 sondas x 5 frequências de coleta de dados), que pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2- Descrição dos cenários de modelagem inversa.

Intervalo de coleta de dados (horas)	Tipo de sensor	Sigla
1	GS1-Decagon	MI-D1h
3	GS1-Decagon	MI-D3h
6	GS1-Decagon	MI-D6h
12	GS1-Decagon	MI-D12h
24	GS1-Decagon	MI-D24h
1	TDR	MI-TDR1h
3	TDR	MI-TDR3h
6	TDR	MI-TDR6h
12	TDR	MI-TDR12h
24	TDR	MI-TDR24h

2.6 Determinação da curva de retenção e condutividade hidráulica em laboratório

Três amostras de solo não deformadas foram coletadas para determinação da curva característica de retenção de água no solo e destinada a laboratório. As amostras foram retiradas nas profundidades de: 0,1; 0,2 e 0,3 m utilizando-se anéis cilíndricos de inox com 0.05 m de diâmetros e 0.051 m de altura para submissão a pressões de 1, 3,3, 10, 30 e 150 m H₂O na câmara de pressão de Richards (RICHARDS, 1948). De posse dos pares de valores de pressão e conteúdo de água no solo, a função hidráulica foi obtida utilizando o RETC, version 6.02.

Outras três amostras de solo foram retiradas nas profundidades: 0,1; 0,2 e 0,3 m por meio de um amostrador de solo tipo Uhland (0.07 m de diâmetro interno e 0.071 m de altura) e conduzidas ao laboratório para determinação da condutividade hidráulica saturada pelo método do permeâmetro de carga constante.

2.7- Simulação da evapotranspiração (ET) do maracujazeiro com curva de retenção de água no solo obtidos por (MI) e (ML)

Com os parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa (MI) e método laboratorial (ML) foram realizadas simulações da evapotranspiração (ET) e conteúdo de água no solo com o uso do modelo agro-hidrológico Soil Water Atmosphere Plant (SWAP) (KROES et al. 2017).

As simulações de ET do maracujazeiro foram comparadas a ET do maracujazeiro medidos pelo lisímetro de pesagem. A determinação da ET no lisímetro foi obtida com base na equação 13.

$$ET_c = I - D \pm \Delta m \quad (13)$$

em que: ET_c é a ET do maracujazeiro (Litro dia⁻¹), I é a irrigação aplicada (Litro), D é a percolação profunda (Litro), e Δm é as variações de massa diária do lisímetro (equivalente a litros). Durante o período do experimento não ocorreu a D .

As simulações foram feitas para 7 intervalos de irrigação, referente a 15 dias de monitoramento da massa do lisímetro.

2.8- Avaliação Estatística

A performance das simulações agro-hidrológicas foi avaliada com base nos índices descritos nas equações 16,17 e 18 conforme o proposto por (MORIASI et al. 2007).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$MAE = \frac{\sum |P_i - O_i|}{n} \quad (17)$$

$$RSR = \frac{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}]}{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{i\text{média}})^2}]} \quad (18)$$

em que: RMSE- é a raiz quadrada do quadrado do erro médio; MAE- é o erro médio absoluto; RSR- é a razão entre a raiz quadrada do quadrado do erro médio em relação ao desvio padrão dos valores observados; O_i -são os valores

observados; P_i - São os valores estimados pelas condições de MI e ML; O_i médio- é a média dos valores observados.

3-RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Influência do tipo de sensor e frequência da coleta do conteúdo de água no solo na curva de retenção obtida por MI.

Na Figura 2 é apresentado um comparativo entre as curvas de retenção de água no solo obtidas por MI em função da frequência da coleta de dados de conteúdo de água no solo com os sensores GS1. As curvas obtidas apresentam semelhantes comprimentos de faixa horizontal próximo da saturação (quando $d\theta/dh=0$), porém com a diminuição da frequência na coleta do conteúdo de água no solo para 3,6,12 e 24 horas houve diminuição na inclinação da curva quando $d\theta/dh \neq 0$, sendo o ponto de inflexão obtida na condição MI-D1h associado a um menor valor de potencial matricial. Em geral, os valores do conteúdo de água no solo associados a um mesmo potencial matricial, foram maiores, quando se diminui a frequência de coleta de dados. Com base no RMSEs obtidos nessas comparações as diferenças variam entre 0,05 e 0,07 $m^3 m^{-3}$, esses valores são considerados expressivos.

Tomando como base -1 mca, valor do potencial mátrico equivalente a capacidade de campo, ponto importante para o manejo da irrigação, o resultado encontrado na curva de MI-D1h foi igual a 0,197 $m^3 m^{-3}$. Os valores de capacidade de campo encontrados nas curvas com as frequências de 3,6,12 e 24 h foram respectivamente: 0,271; 0,275; 0,287 e 0,292 $m^3 m^{-3}$.

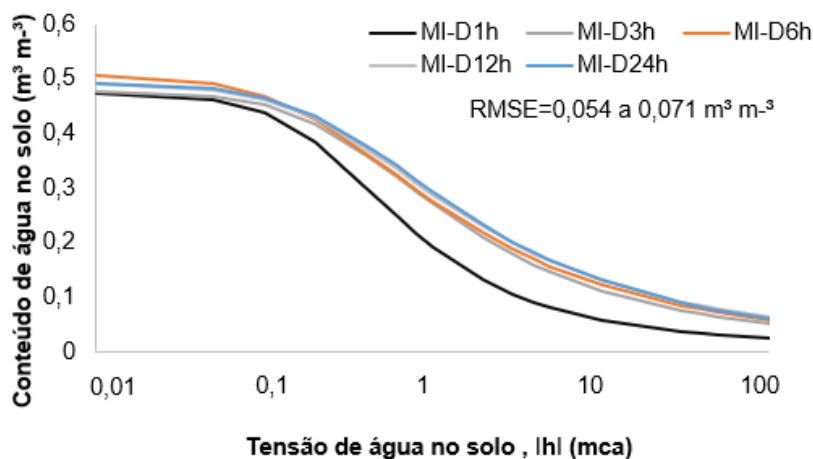


Figura 2- Comparativo entre as curvas de retenção obtidas por MI com dados de conteúdo de água no solo coletados pelo sensor GS1 com frequência de coleta variando de 1 a 24 h.

A comparação das curvas de retenção de água no solo obtidas com MI por meio da coleta do conteúdo de água com os sensores de TDR são apresentadas na figura 3. A coleta do conteúdo de água no solo com a frequência de coleta de 1 a 12 horas, proporcionaram curvas de retenção muito semelhantes, com valores de RMSEs variando entre 0,001 a 0,017 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. O maior RMSE observado foi encontrado na comparação entre MI-TDR 1h e MI-TDR24 h, com um valor igual a 0,063 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, ainda nessa comparação é possível perceber que os valores do conteúdo de água o solo, obtidos com MI-TDR24h são menores que os obtidos em MI-TDR1h a partir do potencial mátrico de -0,2 mca, logo os valores de capacidade de campo são distintos, sendo igual a 0,222 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para MI-TDR1h e 0,124 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ MI-TDR24h.

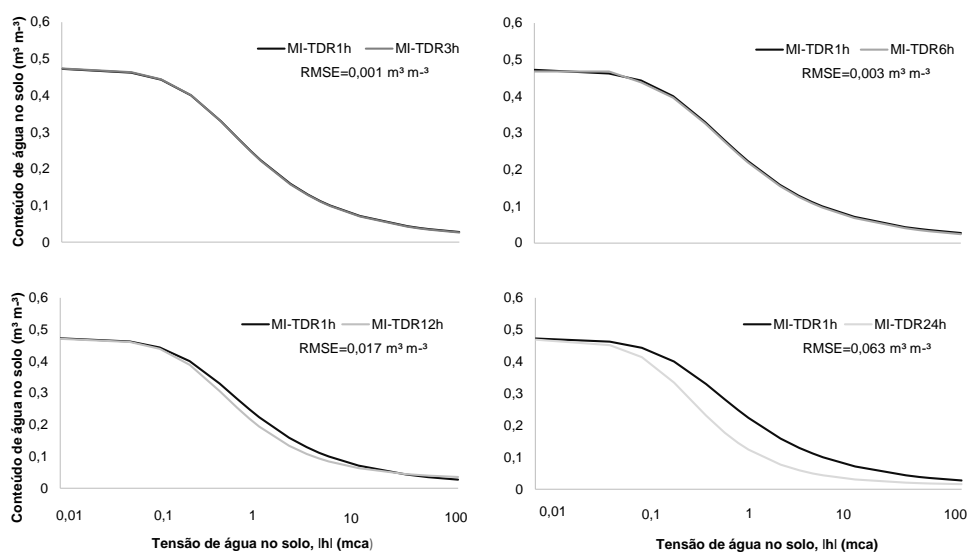


Figura 3- Comparativo entre as curvas de retenção obtidas por MI com dados de conteúdo de água no solo coletados pelo sensor TDR com frequência de coleta variando de 1 a 24 h.

Na tabela 3 são apresentados os resultados dos ajustes da modelagem inversa oriundas do Hydrus 1D. Os melhores ajustes foram obtidos nos cenários: MI-D1h; MI-TDR1h; MI-TDR3h; MI-TDR6h e MI-TDR12h. Essas condições apresentaram respectivamente os índices de ajuste iguais a: ($R^2=94,52\%$ e

RMSE=0,0022 m³ m⁻³); (R²=92,12% e RMSE=0,004 m³ m⁻³); (R²=92,13% e RMSE=0,00385 m³ m⁻³); (R²=91,13% e RMSE=0,00485 m³ m⁻³) e (R²=90,13% e RMSE=0,005 m³ m⁻³). As demais condições proporcionaram RMSEs maiores que 0,01, R² inferiores a 90 %, indicando um ajuste ruim do método de MI. Esse desempenho estatístico também foi observado por Silva et al. (2020) que encontraram R²=0,93 e um RMSE de 0,006 m³ m⁻³, quando determinou as propriedades hidráulicas do solo por modelagem inversa em um lisímetro cultivado com maracujazeiro amarelo irrigado.

Os índices encontrados indicam que as propriedades hidráulicas obtidas por MI-D com intervalo de coleta de 1h e MI-TDR com intervalos de coleta de 1,3,6 e 12 horas apresentam boa acurácia em relação aos valores medidos do conteúdo de água no solo e evaporação de água no solo medidos pela plataforma de pesagem.

Tabela 3- Desempenho estatístico dos resultados da modelagem inversa oriundo do HYDRUS 1D.

Método	RMSE (m³ m⁻³)	R² Ajustado
MI-D1h	0,002	0,945
MI-D3h	0,033	0,887
MI-D6h	0,041	0,82
MI-D12h	0,044	0,802
MI-D24h	0,045	0,790
MI-TDR1h	0,0039	0,921
MI-TDR3h	0,0038	0,921
MI-TDR6h	0,0034	0,921
MI-TDR12h	0,0032	0,934
MI-TDR24h	0,035	0,875

A frequência na coleta do conteúdo de água no solo para obtenção das propriedades hidráulicas por MI com a TDR não promoveu grandes diferenças nos resultados da curva de retenção de água no solo, isso está atrelado a característica do instrumento apresentar alta resolução temporal, conseguindo perceber melhor as variações de conteúdo de água no solo durante a redistribuição e secamento da água no solo (SUSHA LEKSHMI et al., 2014).

3.2- Implicação dos procedimentos de obtenção das propriedades hidráulicas do solo no manejo da irrigação.

Na tabela 4 são apresentadas as propriedades hidráulicas do solo obtidas por MI e ML. Observando os resultados de θ_r , foi possível perceber que o valores obtidos por ML foi igual a $0,114 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo notória a diferença dos resultados obtidos por MI. Essas diferenças foram superiores a $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Comportamento similar foi apontado por Bittely & Flury (2009), quando observou os erros inerentes as curvas de retenção obtidos por câmaras de richards. O mesmo comportamento foi observado por Silva et al., (2020) que encontrou diferenças de θ , próximas do que foi obtido nesse estudo.

A condutividade hidráulica saturada (K_s) obtida por todos os cenários de MI foram maiores que os valor obtidos por ML, exceto o cenário MI-D3h, MI-D12h e MI-D24h que apresentaram respectivamente 0,116, 0,190 e 0,130 m dia^{-1} . As diferenças entre MI e ML para K_s variaram entre $0,042 \text{ m dia}^{-1}$ e $0,101 \text{ m dia}^{-1}$.

Tabela 4- Propriedades hidráulicas do solo obtidas por modelagem inversa (MI) e método laboratorial (ML).

Método	$\theta_s \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$	$\theta_r \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)}$	$\alpha \text{ (m}^{-1}\text{)}$	$n \text{ (-)}$	$\lambda \text{ (-)}$	$K_s \text{ (m dia}^{-1}\text{)}$
MI-D1h	0,474	0,015	3,190	1,642	0,001	0,049
MI-D3h	0,476	0,017	3,361	1,449	0,001	0,116
MI-D6h	0,507	0,013	4,779	1,391	0,275	0,029
MI-D12h	0,494	0,155	3,824	1,390	0,507	0,191
MI-D24h	0,493	0,011	3,519	1,392	0,145	0,130
MI-TDR1h	0,474	0,011	3,643	1,566	0,001	0,063
MI-TDR3h	0,475	0,010	3,670	1,569	0,003	0,063
MI-TDR6h	0,461	0,011	3,605	1,562	0,073	0,073
MI-TDR12h	0,472	0,028	3,899	1,694	0,046	0,076
MI-TDR24h	0,470	0,014	5,478	1,822	0,224	0,088
CM	0,475	0,110	7,800	1,520	0,500	0,130

Na Figura 4 é apresentado o comportamento do conteúdo de água no solo em função do potencial de água no solo para os cenários de MI que apresentaram o melhor ajuste estatístico (Tabela 2) e ML. Observando a tendência dos gráficos é possível perceber que as curvas de retenção de água no solo obtidas por MI apresentam a mesma tendência e os valores de conteúdo de água no solo são muito próximos, desde $h=0$ a $h=-100 \text{ m}$, já quando se compara o potencial a partir de $h=-1$ os valores do conteúdo de água no solo se distanciam muito entre MI e ML.

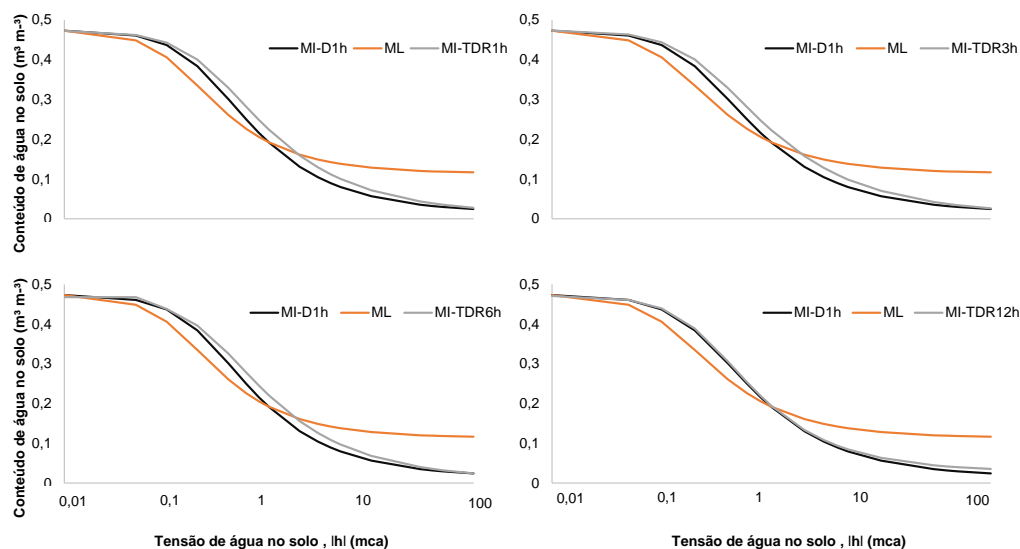


Figura 4- Conteúdo de água no solo em função do potencial, por modelagem inversa com sondas da decagon e TDR e ML.

Solos com alto teor de areia, como o deste estudo apresentam tensões referentes a capacidade de campo variando entre -0,6 mca e -1 mca. Por ML os valores do conteúdo de água no solo associados ao potencial de -0,6 mca é igual a $0,226 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo que os valores observados por MI foram, em geral, maiores com diferenças variando entre $0,024$ e $0,056 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. No potencial de -1 mca, os valores do conteúdo de água no solo nos cenários MI-TDR 1,3,6, são respectivamente iguais a $0,224, 0,223$ e $0,221 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ enquanto o valor de nos cenários MI-D1h, MI-TDR12h e ML são respectivamente iguais a $0,193, 0,194$ e $0,192 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Essas diferenças podem promover resultados variados em protocolos que dependam do conteúdo de água no solo para sua determinação, como exemplo a determinação de lâminas de irrigação, afetando o volume e o momento da irrigação.

Na Figura 5 é apresentado uma projeção das lâminas de irrigação para manter o solo próximo da capacidade de campo (-1 mca) tomando como base as curvas de retenção de água no solo obtidas pelos métodos (MI-D1h, MI-TDR 1,3,6,12 h e ML). Os métodos MI-TDR 1,3,6 proporcionaram lâminas de irrigação com quase 50 % de diferença em relação as lâminas obtidas com as curvas de retenção de água no solo obtidas pelos métodos MI-D1h e MI-TDR 12 h ML. Em relação a lâmina aplicada os métodos MI-TDR 1,3,6 h superestimaram as lâminas aplicadas enquanto os métodos MI-D1h, MI-TDR12h e ML.

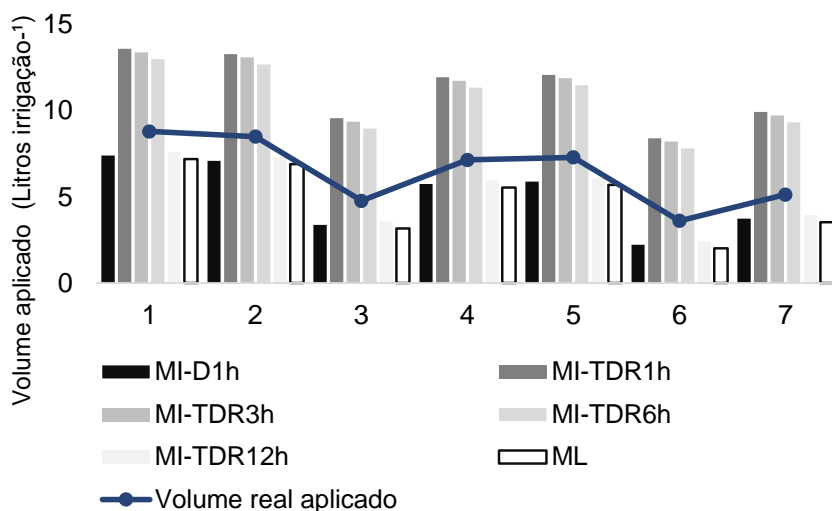


Figura 5- Volumes de irrigação estimados por MI, ML e volume real aplicado.

Limites inferiores são utilizados para indicar o momento de fazer a irrigação, aplicar frequência de irrigação variável e acionamento automático de irrigação. Para cultura do maracujazeiro, Stavely & Wolstenholme (1990) recomendam que o potencial mátrico do solo na irrigação dessa cultura não seja menor que -2 mca. Tomando esse potencial como referência o valor do conteúdo de água no solo observado com os métodos ML, MI-D1h, MI-TDR1, 3,6, 12 h foram, respectivamente, iguais a: 0,161; 0,131; 0,159; 0,158; 0,156 e 0,132 m³ m⁻³.

Utilizando o potencial mátrico de -1 mca como capacidade de campo e -2 como limite crítico inferior para os métodos ML, MI-D1h, MI-TDR1, 3,6, 12 h os valores de lâmina de irrigação foram iguais a: 15,471; 30,473; 32,400; 32,515; 32,378 e 30,282 mm. As distinções das irrigações em função das curvas obtidas por MI e ML ocorrem especialmente pelas diferenças nos pares de valores finais da curva observados (solo seco). Esses resultados afetam diretamente a tomada decisão em manejo de irrigação, dentro da premissa de quanto irrigar, pois adotando essas tensões, o método ML proporcionariam uma lâmina de irrigação menor e dentro da premissa de quando irrigar, haja vista que limites críticos podem ser utilizados para apontar o momento da irrigação e podem ser utilizados em sistemas de irrigação com acionamento automático (DABACK et al. 2015; NOLZS et al. 2016; CHEN et al. 2020).

Na Figura 6 é possível observar a série temporal do conteúdo de água no solo, que foram utilizados para determinar a lâmina de irrigação e elaborar a Figura 5. A média dos valores do conteúdo de água no solo após a irrigação foi igual a $0,201 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ com uma variação de $(\pm 0,001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3})$, podendo ser entendido como a capacidade de campo. Esse resultado mostra que nas condições desse estudo, o potencial referente a esse valor do conteúdo de água no solo é diferente conforme o método utilizado para determinar a curva de retenção de água no solo e os valores observados foram: (ML= -0,86 mca); (MI-D1h=-0,9 mca); (MI-TDR1,3,6h=-1,2 mca); (MI-TDR12 h= -0,93).

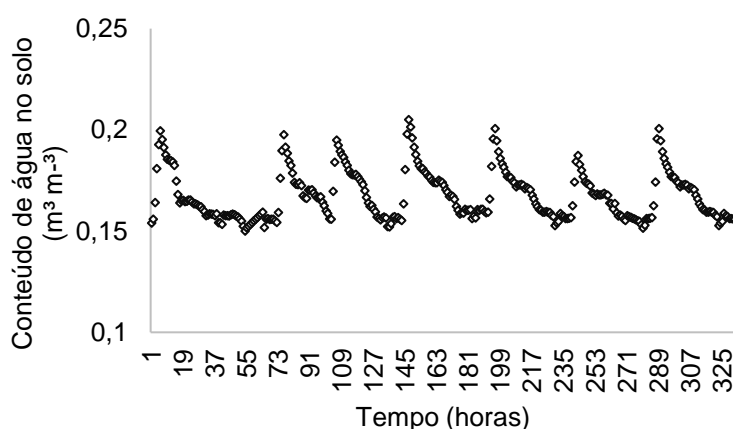


Figura 6- Série temporal da média do conteúdo de água no solo obtida no lisímetro cultivado com maracujazeiro

As diferenças nos CAS associados a tensões mais negativas também foram relatadas por Cressrel et al. (2008), por Bitelly & Fluri. (2009), Solone et al (2012), Dexter et al (2012), Van Lier et al., (2019) e por Silva et al. (2020). A causa dessa diferença nos valores do conteúdo de água no solo em tensões mais negativas no solo, ocorre pela ausência de equilíbrio hidrostático entre a amostra de solo e a placa porosa que recebe pressão no interior da câmara de pressão de Richards. No processo convencional o solo é retirado algumas vezes da superfície da placa porosa causando assim uma redução da condutividade hidráulica do solo e promovendo diferenças nas regiões de menor potencial da curva.

Os resultados aqui encontrados mostram que existe influência do tipo do sensor e do intervalo de coleta de dados para se determinar das propriedades

hidráulicas por modelagem inversa, apontando estratégias para mitigação dos erros inerentes ao manejo de irrigação via solo, que tem sua base as curvas de retenção de água no solo e de instrumentos que tem como princípio o potencial de água no solo (DABACK et al. 2015).

Os resultados ainda promovem um alerta, pois as propriedades hidráulicas do solo também são utilizadas para determinar limite crítico dos cultivos, como o caso de Campos et al. (2021) que indicaram tensões da água no solo como diretrizes de manejo para irrigação da palma forrageira e Liu et al., (2012) que indicou tensões de água no solo como estratégias de manejo na cultura da pimenta irrigada por gotejamento e com cobertura no solo no Nordeste da China. As recomendações de tensões de água no solo, para manejo é recorrente, sendo essa prática muito adotada por diversos autores em diversas culturas (LÉTOURNEAU et al., 2015; CONTRERAS et al., 2017).

3.3-Implicações das propriedades hidráulicas do solo obtidas por MI e ML na simulação do conteúdo de água no solo e evapotranspiração do maracujazeiro (ETc

A Figura 7 apresenta os valores do conteúdo de água no solo para profundidade de 0,20 m e 0,10 m da planta, medido no solo e simulado no SWAP com a curva de retenção pelo método ML. Os valores simulados seguem a mesma tendência dos valores medidos, porém os valores simulados superestimam as medidas reais. Se a série temporal do conteúdo de água no solo simulada fosse utilizada para determinar as lâminas de irrigação, o montante aplicado nos 7 ciclos seria igual a 75 mm, enquanto os dados medidos proporcionariam 145 mm de lâmina de irrigação.

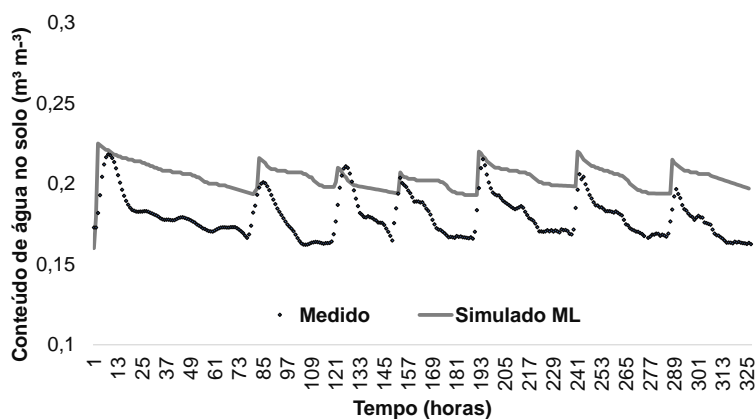


Figura 7- Serie temporal do conteúdo de água no solo medidas e estimadas com o método ML na profundidade de 0,20 m, durante sete intervalos de irrigação.

Na Figura 8 são apresentados series temporais do conteúdo de água no solo em intervalos de irrigação do maracujazeiro, medidos e simulados pelo SWAP com os métodos MI-D1, 3, 6 e 12 h, para profundidade de 0,20 m. As simulações feitas com os métodos MI-D3, 6 e 12 h não seguem bem a tendência dos dados do conteúdo de água no solo medidos, reiterando que esses cenários apresentaram os piores ajustes das propriedades hidráulicas na modelagem inversa feita no Hydrus 1D.

Ainda na Figura 8 é observado o comportamento das simulações do conteúdo de água no solo com o método MI-D1h, as simulações seguiram tanto a tendência, quanto os resultados se aproximaram muito dos valores medidos.

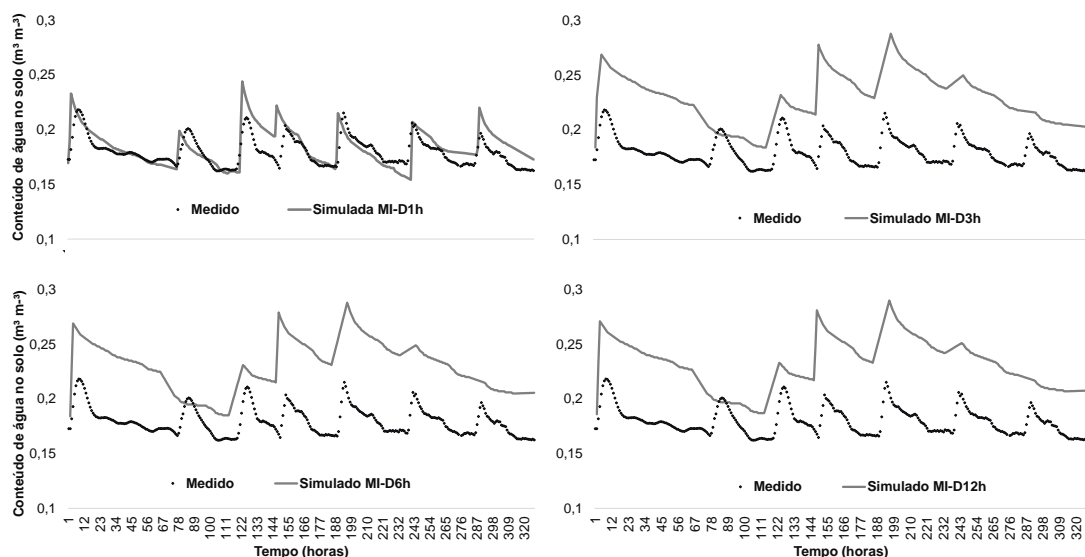


figura 8- Serie temporal do conteúdo de água no solo medidas e simuladas pelos métodos MI-D para profundidade de 0,20 m, durante sete intervalos de irrigação.

As simulações de conteúdo de água no solo feitas com os métodos MI-TDR 1,3,6 e 12 h apresentam a mesma tendência e proximidade dos dados medidos (Figura 9).

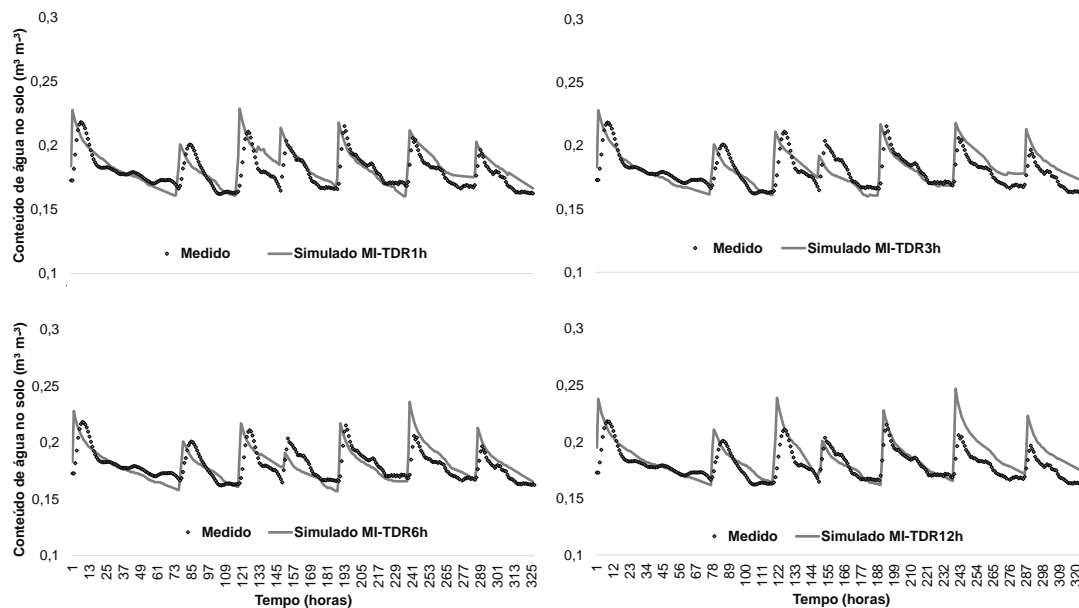


Figura 9- Serie temporal do conteúdo de água no solo medidas e simuladas pelos métodos MI-TDR para profundidade de 0,20 m, durante sete intervalos de irrigação.

Os índices estatísticos da comparação entre os valores do conteúdo de água no solo medidos e simulados são apresentados na tabela 4. Complementando as informações vistas no gráfico os valores de RMSE nas simulações feitas pelo método ML variou entre 0,02 à 0,039 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e MAE variando entre 0,021 a 0,028 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, já as simulações feitas com MI-D 1h e MI-TDR 1,3,6,12 h, foram bem similares com valores de RMSE variando entre 0,008 a 0,028 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e MAE variando entre 0,004 a 0,016 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Tabela 4- Indicadores estatísticos para desempenho dos dados do conteúdo de água no solo (CAS) obtidos com o SWAP com MI-D, MI-TDR e ML.

Indicador	Ciclos						
	1	2	3	4	5	6	7
CAS medido x CAS simulado (ML)							
RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,027	0,0230	0,039	0,02	0,024	0,037	0,031
MAE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,027	0,026	0,028	0,021	0,025	0,027	0,027
CAS medido x CAS simulado (MI-D1h)							
RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,009	0,01	0,008	0,019	0,011	0,023	0,016
MAE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,006	0,005	0,005	0,012	0,0080	0,006	0,011
CAS medido x CAS simulado (MI-TDR1h)							
RMSE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,0102	0,0125	0,0155	0,0155	0,01	0,02	0,009
MAE ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0,006	0,006	0,006	0,0057	0,0090	0,011	0,007

CAS medido x CAS simulado (MI-TDR3h)							
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,01	0,011	0,012	0,012	0,009	0,022	0,012
MAE (m ³ m ⁻³)	0,007	0,006	0,006	0,008	0,006	0,012	0,011
CAS medido x CAS simulado (MI-TDR6h)							
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,011	0,01	0,013	0,012	0,01	0,023	0,024
MAE (m ³ m ⁻³)	0,006	0,005	0,006	0,008	0,004	0,013	0,016
CAS medido x CAS simulado (MI-TDR12h)							
RMSE (m ³ m ⁻³)	0,012	0,013	0,011	0,013	0,01	0,028	0,023
MAE (m ³ m ⁻³)	0,006	0,005	0,007	0,03	0,004	0,013	0,015

O fato das simulações de umidade com propriedades hidráulicas do solo, simuladas com MI, apresentarem a mesma tendência dos dados medidos e erros baixo, pode proporcionar uma ferramenta para simulações de lâminas de irrigação sendo uma alternativa para o manejo via solo no caso de dificuldades com o número de sensores utilizados para monitorar o solo em campo. Além dessa vantagem o uso das séries temporais podem ser utilizadas para detectar outliers e determinar limites superiores em dados medidos em campo para uso em estudos de demanda hídrica e irrigação (ALJOURMANI et al., 2012). Essa abordagem também foi tomada por Karadish & Simunek (2016) comparou métodos físicos como Hydrus 2 e 3D e algoritmos empíricos de aprendizado de máquina, com intuito de apresentar uma técnica simples para determinar o conteúdo de água no solo em cultivo irrigado. Os autores indicaram os métodos físicos como uma alternativa e o comportamento das séries temporais simuladas do conteúdo de água no solo seguiram o mesmo padrão dos dados reais, assim como o desse estudo.

Os valores de ET_c do maracujazeiro simulados pelo SWAP não divergiram entre as simulações feitas por ML e MI. Em relação valores medidos pelo lisímetro as simulações apresentaram boa acurácia com um RMSE de 0,289 mm e um RSR igual a 0,253.

A explicação para não diferença entre as simulações de ET_c, pode ser explicada pela frequência de irrigação adotada neste estudo. Como as irrigações eram feitas com intervalo entre 1 e 2 dias, o solo sempre se mantinha com valores de conteúdo de água no solo dentro da faixa mais húmida dos valores das curvas de retenção de água no sol, e como já exposto as maiores diferenças entre as curvas o obtidas por MI e ML ocorrem nos potências que expressam

valores da curva de retenção referentes ao secamento do solo. Esse comportamento também foi observado por Silva et al. (2020) quando comparou as simulações de ETc por MI e ML para as mesmas condições deste estudo.

O bom desempenho entre as simulações ETc em relação aos valores medidos representa uma alternativa confiável para se obter valores de demanda hídrica dos cultivos, haja vista que os lisímetros são instrumentos com custo alto e implantação laboriosa.

4-CONCLUSÃO

O tipo de sensor e a frequência de coleta dos dados do conteúdo de água no solo interferiram nos resultados das propriedades hidráulicas do solo obtidas por modelagem inversa com implicações na modelagem agro-hidrológica e no manejo da irrigação via sensoriamento da água no solo.

Observou-se diferenças nas curvas de retenção de água no solo obtida pelo método laboratorial e modelagem inversa, porém, essas diferenças não interferiram nas simulações de ETc do maracujazeiro feitas no SWAP para as condições de irrigação localizada em alta frequência.

Os resultados deste estudo alertam para diferenças que podem ocorrer em valores de conteúdo de água no solo, quando estes originam-se de potenciais matriciais a partir de curvas de retenção originadas por protocolos de obtenção distintos. Isto é especialmente importante quando se trata de potenciais matriciais críticos superiores e inferiores utilizados como referência para o momento de desligar e ligar um sistema ou setor de irrigação. Quando se usar as sondas GS1 em modelagem inversa recomenda-se utilizar a coleta de CAS com intervalos de 1 hora, já as sondas de TDR performam bem com as frequências de coletada de CAS entre 1 a 12 horas.

5-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALJOURMANI, B.; SÀNCHEZ-ESPIGARES, J. A.; CANAMERAS, N.; JOSA, R.; MONSERRAT, J. Time series outlier and intervention analysis: Irrigation management influences on soil water content in silty loam soil. **Agricultural water management**, v. 111, p. 105-114, 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

BITTELLI, M.; FLURY, M. Errors in Water Retention Curves Determined with Pressure Plates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1453, 2009.

BROOKS, R. H; COREY, A. T.; THOMAS, A. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. **Transactions of the ASAE**, v. 7, n. 1, p. 26-0028, 1964.

CALAMITA, G.; BROCCA, L.; PERRONE, A.; PISCITELLI, S.; LAPENNA, V.; MELONE, F.; MORAMARCO, T. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. **Journal of Hydrology**, v. 454, p. 101-112, 2012.

CANONE, D.; PREVIATI, M.; FERRARIS, S. Evaluation of stemflow effects on the spatial distribution of soil moisture using TDR monitoring and an infiltration model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 1, p. 04016075, 2017.

CAMPOS, A. R. F., DA SILVA, A. J. P., VAN LIER, Q. D. J., DO NASCIMENTO, F. A. L., FERNANDES, R. D. M., DE ALMEIDA, J. N., & DA SILVA PAZ, V. P. Yield and morphology of forage cactus cultivars under drip irrigation management based on soil water matric potential thresholds. **Journal of Arid Environments**, v. 193, p. 104564, 2021.

CAMPBELL, Gaylon S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil science**, v. 117, n. 6, p. 311-314, 1974.

CONTRERAS, J. I.; ALONSO, F.; CÁNOVAS, G.; BAEZA, R. Irrigation management of greenhouse zucchini with different soil matric potential level. Agronomic and environmental effects. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 26-34, 2017.

CHILDS, E. C.; GEORGE, C. The permeability of porous materials. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 201, n. 1066, p. 392-405, 1950.

CHEN, X.; QI, Z.; GUI, D.; SIMA, M. W.; ZENG, F.; LI, L.; GU, Z. Evaluation of a new irrigation decision support system in improving cotton yield and water productivity in an arid climate. **Agricultural Water Management**, v. 234, p. 106139, 2020.

CRESSWELL, H. P.; GREEN, T. W.; MCKENZIE, N. J. The adequacy of pressure plate apparatus for determining soil water retention. **Soil science society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 41-49, 2008.

DABACH, S.; SHANI, U.; & LAZAROVITCH, N. Optimal tensiometer placement for high-frequency subsurface drip irrigation management in heterogeneous soils. **Agricultural water management**, v. 152, p. 91-98, 2015.

DEXTER, A. R.; CZYŻ, E. A.; & RICHARD, G. Equilibrium, non-equilibrium and residual water: consequences for soil water retention. **Geoderma**, V. 177, P. 63-71, 2012.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water resources research**, v. 30, n. 2, p. 211-223, 1994.

FAN, J.; SCHEUERMANN, A.; GUYOT, A.; BAUMGARTL, T.; & LOCKINGTON, D. A. Quantifying spatiotemporal dynamics of root-zone soil water in a mixed forest on subtropical coastal sand dune using surface ERT and spatial TDR. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 475-488, 2015.

FERRAREZI, R. S.; NOGUEIRA, T. A. R.; ZEPEDA, S. G. C. Performance of soil moisture sensors in Florida sandy soils. **Water**, v. 12, n. 2, p. 358, 2020.

GARDNER, W. R.; MIKLICH, F. J. Unsaturated conductivity and diffusivity measurements by a constant flux method. **Soil Science**, v. 93, n. 4, p. 271-274, 1962.

GROENEVELT, P. H.; GRANT, C. D. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. **European Journal of Soil Science**, v. 55, n. 3, p. 479-485, 2004.

JANIK, G.; KŁOSOWICZ, I.; WALCZAK, A.; SOWIŃSKA, K. A.; RODZEŃSKA, A. J.; SOWIŃSKI, J. Application of the TDR technique for the determination of the dynamics of the spatial and temporal distribution of water uptake by plant roots

during injection irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 252, p. 106911, 2021.

KARANDISH, F.; ŠIMŮNEK, J. A comparison of numerical and machine-learning modeling of soil water content with limited input data. **Journal of Hydrology**, v. 543, p. 892-909, 2016.

KROES, J. G., VAN DAM, J. C., BARTHOLOMEUS, R. P., GROENENDIJK, P., HEINEN, M., HENDRIKS, R. F. A., VAN WALSUM, P. E. V. **SWAP version 4**. Wageningen Environmental Research, 2017.

LÉTOURNEAU, G.; CARON, J.; ANDERSON, L.; CORMIER, J. Matric potential-based irrigation management of field-grown strawberry: Effects on yield and water use efficiency. **Agricultural Water Management**, v. 161, p. 102-113, 2015.

LIU, H.; YANG, H.; ZHENG, J.; JIA, D.; WANG, J.; LI, Y.; HUANG, G. Irrigation scheduling strategies based on soil matric potential on yield and fruit quality of mulched-drip irrigated chili pepper in Northwest China. **Agricultural water management**, v. 115, p. 232-241, 2012.

LI, N.; SUN, Y.; WAN, L.; REN, L. Estimating Soil Hydraulic Parameters by Inverse Modeling with PEST. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 11, p. 0, 2017.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

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.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; & FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 2019.

NOLZ, R.; CEPUDER, P.; BALAS, J.; LOISKANDL, W. Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 164, p. 235-242,

2016.

OATES, M. J.; RAMADAN, K.; MARTÍNEZ, J. M.M.; CANALES, A. R. Automatic fault detection in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. **Agricultural Water Management**, v. 183, p. 41-48, 2017.

PINHEIRO, E. A. R.; VAN LIER, Q. D. J.; INFORSATO, L.; ŠIMŮNEK, J. Measuring full-range soil hydraulic properties for the prediction of crop water availability using gamma-ray attenuation and inverse modeling. **Agricultural Water Management**, v. 216, n. August 2018, p. 294–305, 2019.

PETERS, A.; IDEN, S.C.; DURNER, W. Revisiting the simplified evaporation method: Identification of hydraulic functions considering vapor, film and corner flow. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 531-542, 2015.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3585, 2020.

REYNOLDS, S. G. The gravimetric method of soil moisture determination Part IA study of equipment, and methodological problems. **Journal of Hydrology**, v. 11, n. 3, p. 258-273, 1970.

RITTER, A.; HUPET, F.; CARPENA, R.M.; LAMBOT, S., VANCLOOSTER, M. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 2, p. 77-96, 2003.

RICHARDS, L. A. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. **Soil Science**, v. 66, n. 2, p. 105-110, 1948.

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

SCHMUGGE, T. J.; JACKSON, T. J.; MCKIM, H. L. Survey of methods for soil moisture determination. **Water Resources Research**, v. 16, n. 6, p. 961-979, 1980

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.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 7, p. vzj2016. 04.0033, 2016.

ŠIMŮNEK, J.; van GENUCHTEN, M. T.; WENDROTH, O. Parameter Estimation Analysis of the Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 894, 1998.

SOLONE, R.; BITTELLI, M.; TOMEI, F.; & MORARI, F. Errors in water retention curves determined with pressure plates: Effects on the soil water balance. **Journal of Hydrology**, v. 470, p. 65-74, 2012.

STAVELEY, G. W.; WOLSTENHOLME, B. N. Effects of water stress on growth and flowering of *Passiflora edulis* (Sims) grafted to *P. Caerulea* L. In: **International Symposium on the Culture of Subtropical and Tropical Fruits and Crops 275**. 1989. p. 551-558.

SUSHA LEKSHMI, S.U.; SINGH, D. N.; BAGHINI, Maryam Shojaei. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92-105, 2014.

TERUEL, J. D.G.; SÁNCHEZ, R.T; ROS, P. J.B.; MOREO, A. B.T, BUENDÍA, M.J.; VALLES, F.S. Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. **Sensors**, v. 19, n. 3, p. 491, 2019.

VAN GENUCHTEN, M. T. A. Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VAN LIER, Q. D. J.; PINHEIRO, E. A. R.; & INFORSATO, L. Hydrostatic equilibrium between soil samples and pressure plates used in soil water retention determination: consequences of a questionable assumption. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019.

VAZ, C. M.; JONES, S.; MEDING, M., & TULLER, M. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 2, p. vzj2012. 0160, 2013.

WENDROTH, O.; EHLERS, W.; HOPMANS, J. W.; KAGE, H.; HALBERTSMA, J., WÖSTEN, J. H. M. Reevaluation of the Evaporation Method for Determining Hydraulic Functions in Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 1436–1443, 1993.

WIND, G. P. **Capillary conductivity data estimated by a simple method.** [sn], 1966.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os valores de evapotranspiração do maracujazeiro (ET_c) obtidos pelo balanço de água no solo com dados de CAS (θ) obtidos a partir de espaços uni

e bidimensional são semelhantes aos valores de ET_c obtidos por lisimetria. Isso demonstra que é possível usar sensores de água do solo para quantificar ET_c em um sistema de gotejamento com frente de umedecimento 2D / 3D.

Na determinação do BAS os sensores devem ser instalados preferencialmente na zona do bulbo molhado próximos ao gotejador. O estudo revela que, quando os sensores podem ser distribuídos em 2D / 3D, o sistema de irrigação ou seção pode ser acionado usando o sinal de um único sensor que representa a extração média de todo o perfil monitorado. No caso específico deste experimento, por exemplo, verificou-se que a instalação de uma única sonda entre 0 e 0,3 m de profundidade e a 0,10 m de distância do gotejador, permitiu a obtenção de valores de ET_c próximos aos obtidos por lisímetro de pesagem.

O tipo de sensor e a frequência de coleta dos dados de CAS interferiram nos resultados das propriedades hidráulicas do solo obtidas por modelagem inversa com implicações na modelagem agro-hidrológica e no manejo da irrigação via sensoriamento da água no solo.

Os resultados deste estudo alertam para diferenças que podem ocorrer em valores de CAS quando estes originam-se de potenciais matriciais a partir de curvas de retenção originadas por protocolos de obtenção distintos. Isto é especialmente importante quando se trata de potenciais matriciais críticos superiores e inferiores utilizados como referência para o momento de desligar e ligar um sistema ou setor de irrigação.

Os resultados aqui encontrados, não são respostas generalistas sobre o posicionamento de sensores ou das variações da obtenção das propriedades hidráulicas do solo, mas chamam a atenção para erros que podem ocorrer na escolha do posicionamento de sensores é dos procedimentos adotados para obtenção das propriedades hidráulicas solo, quando aplicadas para o manejo da irrigação, balanço de água no solo e modelagem agro-hidrológica.