

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

LUCAS MASSAYUKI SATO

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DIMENSIONAMENTO
DO BULBO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO**

ARARAS

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

LUCAS MASSAYUKI SATO

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA DIMENSIONAMENTO
DO BULBO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Agricultura e Ambiente**.

Orientador: Prof. Dr. José Geanini Peres

Coorientador: Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza

ARARAS

2012

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

S253am

Sato, Lucas Massayuki.

Avaliação de modelos matemáticos para dimensionamento do bulbo molhado na irrigação por gotejamento / Lucas Massayuki Sato. -- São Carlos : UFSCar, 2012.
58 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Irrigação. 2. Modelos matemáticos (Simulação matemática). 3. Irrigação localizada. 4. Reflectometria no domínio do tempo (TDR). I. Título.

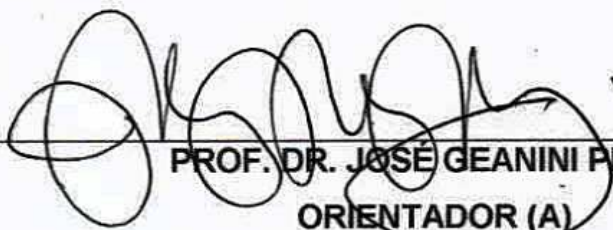
CDD: 631.587 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE

LUCAS MASSAYUKI SATO

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
E AMBIENTE, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, **EM 30 DE
MARÇO DE 2012.**

BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. JOSÉ GEANINI PERES

ORIENTADOR (A)

DRNPA/CCA/UFSCar



PROF. DR. CLAUDINE FONSECA SOUZA

CO-ORIENTADOR (A)

DRNPA/CCA/UFSCar



PROF. DR. OSNY OLIVEIRA SANTOS BACCHI

CENA/USP



PROF. DR. MARCIO ROBERTO SOARES

DRNPA/CCA/UFSCar

DEDICO

*...aos meus pais, **Akira** e **Neuza**, por todo amor e carinho oferecidos e por sempre me incentivarem em todos os momentos de minha vida;*

*aos meus irmãos **Tiemi**, **Akio** e **Julio** e todos familiares que sempre me apoiaram;*

*e principalmente ao meu irmão **CARLOS EDUARDO** (in memoriam) pela amizade, companheirismo, pelo exemplo de vida permanecerá para sempre em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Para Deus, que me deu a vida e por me guiar nos caminhos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. José Geanini Peres, pela orientação, amizade e principalmente por todos os conselhos compartilhados, tornando possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza, pela oportunidade, amizade, confiança e dedicação para a elaboração deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente do CCA-UFSCar pela oportunidade oferecida.

A CAPES, pela bolsa concedida.

À minha amada Natasha, por todo carinho, apoio, paciência e principalmente por fazer parte da minha vida.

À minha nova família, principalmente Kathia, Anésia e Gustavo pelos valiosos conselhos e incentivo.

Aos meus colegas do mestrado, principalmente aos companheiros de “salinha” Bruno, Mariane, Monica e Vanessa pelo apoio e ótimos momentos proporcionados.

Aos funcionários do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos.

Aos companheiros de república Pedro, Leonardo, Daniel e Eike pelo agradável convívio.

A todos que contribuíram para a concretização deste trabalho e me auxiliaram durante o curso de pós-graduação, pessoal e profissionalmente.

AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO BULBO MOLHADO NA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

RESUMO

A crescente demanda de água tem originado conflitos entre seus usos múltiplos, sendo a agricultura responsável pela utilização da maior parcela deste recurso natural. Neste quadro, a irrigação por gotejamento tem apresentado crescimento em área irrigada devido a sua potencialidade de obter alta eficiência na aplicação de água. A irrigação por gotejamento é caracterizada pela aplicação de pequenos volumes de água em alta frequência diretamente na zona radicular das plantas, permitindo manter a umidade do solo próxima a sua capacidade de campo em um determinado volume de solo denominado normalmente de bulbo molhado. O conhecimento das dimensões do bulbo molhado gerado pelo gotejador a ser utilizado no projeto de irrigação é de fundamental importância para o correto dimensionamento e operação dos sistemas de irrigação por gotejamento. O objetivo deste trabalho foi testar o desempenho dos modelos Schwartzman-Zur Reproduzido e HYDRUS-2D na previsão das dimensões dos bulbos molhados gerados por gotejadores de diferentes vazões. Na sua primeira parte, realizada na área experimental da Universidade de Taubaté, foram coletadas as dimensões dos bulbos molhados gerados por gotejadores de 2, 4 e 8 L.h⁻¹ em um Latossolo vermelho-amarelo. Na segunda, foram simuladas as dimensões dos bulbos molhados utilizando-se os modelos matemáticos Schwartzman-Zur Reproduzido e HYDRUS-2D. Os estudos estatísticos utilizados para avaliar o desempenho desses modelos mostraram que o modelo de Schwartzman-Zur Reproduzido ajustou os dados experimentais com precisão de 94%, enquanto que, no caso do modelo HYDRUS-2D, esta precisão foi de 85%. Concluiu-se que os dois modelos estudados podem estimar adequadamente as dimensões do bulbo molhado para as condições estudadas, destacando-se, porém, que o modelo que apresentou melhor desempenho foi o de Schwartzman-Zur Reproduzido.

PALAVRAS-CHAVE: manejo de irrigação, simulação matemática, irrigação localizada, sonda de TDR.

EVALUATION OF MATHEMATICAL MODELS FOR WET BULB DESIGN IN DRIP IRRIGATION

ABSTRACT

The increasing current demand of water has caused conflicts between their multiple uses, being the agriculture responsible for the use of the largest portion of this natural resource. In this context, drip irrigation has shown growth in irrigated area due to their potential to achieve high efficiency in water application. Drip irrigation is characterized by the application of small volumes of water at high frequency directly in the root zone of plants, helping to maintain soil moisture near field capacity in a given volume of soil usually called the wet bulb. Knowing the dimensions of the wetted generated to be used in drip irrigation project is of fundamental importance for the proper design and operation of drip irrigation systems. The objective of this study was to test the performance of the mathematical models Schwartzman and Zur Reprinted and HYDRUS-2D in predicting dimensions of wet bulb generated generated by emitters of different flow flow rates. In its first part, held at the experimental field of Taubate University, were collected the dimensions of the wet bulbs generated by drip of 2, 4 and 8 L h⁻¹ in a dystrophic red-yellow. In the second, were simulated the dimensions of wet bulb using Schwartzman and Zur Reprinted and HYDRUS-2D models. Statistical analysis used to evaluate the performance of these models have shown that the model Schwartzman Zur Reproduced predicted the experimental data set with an accuracy of 94%, whereas in the case of model HYDRUS-2D, this accuracy was 85%. It was concluded that the two studied models can adequately estimate the dimensions of the wet bulb, for the studied conditions, highlighting, however, that the model performed better was Schwartzman-Zur Reprinted.

KEYWORDS: irrigation management, mathematical simulation, irrigation, TDR probe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração das dimensões do bulbo molhado.....	18
Figura 2. Casa de vegetação e sua ilustração com dimensões.	20
Figura 3. Armação das sondas de TDR.	22
Figura 4. Gabarito para construção (A) da sonda de TDR (B).	22
Figura 5. Reflectômetro TDR 100.	23
Figura 6. Ilustração e disposição das sondas na trincheira.	24
Figura 7. Sistema com frasco Mariotte.	25
Figura 8. Detalhe dos multiplexadores.	25
Figura 9. Processo da formação do disco saturado.	26
Figura 10. Formação do disco saturado e da frente de umedecimento.	26
Figura 11. Medição do disco saturado e da frente de umedecimento.	27
Figura 12. Tela inicial do software HYDRUS-2D.	30
Figura 13. Tela de informações geométricas requeridas pelo software HYDRUS-2D.	31
Figura 14. Tela de Informações temporais requeridas pelo software HYDRUS-2D.	32
Figura 15. Tela dos critérios de iterações requeridos pelo software HYDRUS-2D.	32
Figura 16. Tela das condições de contorno requeridas pelo software HYDRUS-2D.	33
Figura 17. Tela dos parâmetros do modelo van Genuchten requeridos pelo software HYDRUS-2D.	34
Figura 18. Tela do aplicativo formando a malha triangular.	35
Figura 19. Tela de inserção do disco saturado requerido pelo software HYDRUS-2D.	35
Figura 20. Tela de divisão das três profundidades analisadas.	36
Figura 21. Tela da Execução da simulação no software HYDRUS-2D.	36
Figura 22. Raio do bulbo molhado observado após as aplicações de 2 L h^{-1}	39
Figura 23. Raio do bulbo molhado observado após as aplicações de 4 L h^{-1}	39
Figura 24. Raio do bulbo molhado observado após as aplicações de 8 L h^{-1}	40

Figura 25. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de água para a vazão de 2 L h^{-1} .	42
Figura 26. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de água para vazão de 4 L h^{-1} .	44
Figura 27. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de água para vazão de 8 L h^{-1} .	45
Figura 28. Correlação entre d^* e V^* , e a obtenção das equações exponenciais de correlação.	47
Figura 29. Correlação entre z^* e V^* , e a obtenção das equações exponenciais de correlação.	47
Figura 30. Profundidades estimadas pelo modelo Schwartzman & Zur reproduzido versus valores observados.	50
Figura 31. Diâmetros estimados pelo modelo Schwartzman & Zur Reproduzido versus valores observados.	50
Figura 32. Profundidades estimadas pelo modelo HYDRUS-2D versus valores observados.	51
Figura 33. Diâmetros estimados pelo modelo HYDRUS-2D versus valores observados.	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 Irrigação por gotejamento	12
2.2 Umidade do solo	14
2.3 A técnica da TDR	15
2.4 Modelos matemáticos para o dimensionamento do bulbo molhado.....	16
2.5 Condutividade hidráulica saturada	18
3 MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Caracterização da área experimental	20
3.2 Técnica da TDR.....	21
3.2.1 Construção das Sondas de TDR	21
3.2.2 Equipamento de TDR	22
3.3 Instalação das sondas de TDR na trincheira	23
3.4 Condução do ensaio	24
3.5 Coleta dos diâmetros do disco saturado.....	26
3.6 Modelos matemáticos utilizados.....	27
3.6.1 Modelo Schwartzman & Zur (1986).....	27
3.6.2 HYDRUS-2D.....	29
3.6.2.1 Preparação do modelo HYDRUS-2D	30
3.7 Análise estatística	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Disco saturado versus área superficial molhada	38
4.2 Distribuição e armazenamento de água no solo	41
4.3 Correlações entre os parâmetros adimensionais do modelo Schwartzman- Zur Reproduzido.....	45
4.4 Comparação entre os valores observados e simulados	48
5 CONCLUSÕES.....	54
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Apesar de a água ser um recurso natural muito abundante na Terra, visto que ela ocupa próximo de 75% da sua superfície, somente 2,5% do seu total correspondem à água doce, própria para consumo.

A área irrigada na Terra, embora correspondente a apenas 17% da área total cultivada, responde por aproximadamente 40% da produção agrícola mundial, sinalizando a grande importância da irrigação na produção de alimentos e fibras.

Dentre os diferentes usos múltiplos da água, a agricultura é a atividade humana que mais consome água, cerca de 70% da água utilizada globalmente. Esta grande demanda de água tem dado origem a conflitos com outros usos da água, principalmente com o abastecimento para consumo e para a geração de energia elétrica.

No Brasil, a área irrigada corresponde a 4.450.000 hectares, onde a irrigação localizada, destacando a irrigação por gotejamento, representa 8% deste total. Nos últimos anos, se tem verificado um aumento anual na área irrigada brasileira de 150.000 hectares (PAULINO et al., 2011).

Dentre os métodos de irrigação, a irrigação localizada é aquela que tem apresentado maior crescimento mundial em termos de área irrigada, substituindo, principalmente, os métodos superficiais de irrigação. No Brasil, durante a última década, a área irrigada pelos métodos localizados triplicou.

A irrigação localizada vem se destacando devido ao fato dela ser um método de irrigação flexível e com potencial para a prática da irrigação de precisão, o que permite a obtenção de altas eficiências na aplicação de água, que podem chegar a 95%. Outro ponto a favor da irrigação localizada é que ela pode ser utilizada em diferentes condições climáticas, topográficas e de solo, o que tem permitido a utilização de áreas até então consideradas marginais para a prática da agricultura irrigada.

Na irrigação localizada, diferentemente dos outros métodos de irrigação, a água é aplicada apenas em uma fração da área ocupada pela planta, geralmente nas vizinhanças ou dentro da sua zona radicular. A porcentagem ideal de área a ser molhada é um parâmetro difícil de ser obtido e, na prática, ela é considerada entre 33 e 67% da área ocupada pela planta.

Uma das dificuldades encontradas no planejamento da irrigação localizada é a determinação do número de emissores que devem ser utilizados para se atingir a porcentagem de área a ser molhada por planta.

Para tanto, há necessidade de se determinar as dimensões do volume de solo molhado, normalmente denominado de bulbo molhado, pelos emissores utilizados na irrigação. A determinação das dimensões do bulbo molhado é uma tarefa complexa, uma vez que o volume de solo molhado por um emissor é função do volume de água a ser aplicado, da vazão do emissor e da textura e estrutura do solo.

O bulbo molhado por um emissor pode ser representado adequadamente por duas dimensões: a sua largura, ou diâmetro, na superfície do solo e a sua profundidade. A maneira ideal para a determinação das dimensões do bulbo molhado é através de ensaio de campo, para o qual está disponível metodologia já consagrada. Outra forma, que é de fato a mais utilizada, é obter estas informações a partir de tabelas, as quais levam em consideração a vazão do emissor, a profundidade das raízes, a textura do solo e o grau de estratificação do solo.

A determinação direta das dimensões do bulbo molhado no campo é um processo demorado e também caro, normalmente fora do alcance das condições técnico-financeiras da maioria dos praticantes da irrigação; enquanto que a sua obtenção por meio de tabelas, embora prático e comum, se constitui em uma aproximação grosseira da realidade.

Uma forma intermediária entre os procedimentos anteriores é a utilização de modelos matemáticos, os quais simulam o formato e as dimensões do bulbo molhado a partir de características relacionadas ao solo, como umidade e condutividade hidráulica, e ao emissor utilizado, como a sua vazão. Dentre os modelos matemáticos disponíveis destacam-se o Schwartzman-Zur Reproduzido e o HYDRUS-2D.

Diante do que foi exposto, este trabalho teve como objetivo testar os modelos matemáticos Schwartzman-Zur Reproduzido e HYDRUS-2D, comparando os seus resultados com as informações coletadas em condições de campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação por gotejamento

Segundo Dasberg e Or (1999), a irrigação por gotejamento é caracterizada pela aplicação de pequenos volumes de água diretamente na zona radicular da planta, formando um volume de solo molhado, denominado normalmente de bulbo molhado.

A irrigação por gotejamento está em crescimento no mundo, sendo viável, porém, somente em áreas específicas e para culturas economicamente rentáveis. Esta limitação é econômica, pois o método possui alto custo de equipamentos, instalação e manutenção. Esta limitação pode ser agravada em regiões que possuem alto custo na captação da água.

Como sua principal vantagem, se destaca a eficiência de irrigação e o baixo consumo de água e energia. Segundo Barros et al. (2010), a irrigação por gotejamento, quando bem manejada, possibilita alcançar maior eficiência de aplicação de água e também de nutrientes.

O sistema de irrigação por gotejamento, geralmente tem como componente: a linha principal, as linhas laterais, as linhas secundárias e um cabeçal de controle. As linhas laterais são de polietileno, flexíveis e de textura opaca a fim de se evitar que algas se desenvolvam e assim causem entupimento no sistema. Ainda nas linhas laterais, são encontrados os gotejadores. As linhas secundárias encaminham água da linha principal até às linhas laterais e normalmente são enterradas. O cabeçal de controle é um subsistema composto de moto bomba, filtro de areia, filtro de tela, misturador de adubos, válvula e registro, e tem a função de fornecer água limpa a pressão suficiente para os gotejadores. O êxito da irrigação por gotejamento depende do processo de filtração, bom funcionamento dos gotejadores e dos dimensionamentos previstos no projeto de irrigação (KELLER e BLIESNER, 1990).

Segundo Souza e Matsura (2004), a vazão do gotejador, juntamente com as variáveis de umidade durante o processo de infiltração, tem importância fundamental no formato do bulbo molhado.

A distância entre os gotejadores nas linhas laterais de irrigação é dependente do formato e das dimensões dos bulbos molhados, os quais devem coalescer dando origem a uma faixa de solo úmida e contínua ao longo das fileiras de plantas da cultura a ser irrigada.

É possível determinar visualmente a diferença de coloração entre o solo molhado e solo seco durante o processo de irrigação, em uma área de interface denominada de frente de molhamento. Entretanto, no caso da infiltração de água em solos relativamente úmidos, a frente de molhamento é difusa e portanto difícil de ser visualizada (REICHARDT, 1990).

A propagação da frente de molhamento no solo, proveniente de uma fonte pontual de água, é tridimensional, sendo que o formato do bulbo molhado dependerá, principalmente, do equilíbrio entre as forças capilares e as gravitacionais. Entretanto, devido o solo ser um meio heterogêneo, a infiltração da água no solo também é afetada pelas suas propriedades físicas, com destaque para a textura, estrutura, condutividade hidráulica e a umidade inicial do solo, bem como pelas características do gotejador, como vazão e volume de água aplicado (SOUZA e MATSURA, 2004).

Durante o processo de infiltração, identifica-se ao redor do gotejador uma área saturada na superfície do solo, normalmente denominado de disco saturado. A variação espacial das propriedades físicas do solo muito contribui para as variações nos padrões de infiltração e distribuição da água pelos gotejadores. Estas variações no bulbo molhado constituem um problema para a estimativa do número de gotejadores por planta e de sua localização em relação às plantas ou as fileiras de plantas (OR, 1996).

A percentagem de área molhada depende de fatores relacionados ao espaçamento e a vazão dos gotejadores e as propriedades físicas do solo. Para Karmeli & Keller (1975), não existe um valor mínimo fixo para a porcentagem de área molhada por planta. Segundo Pizarro (1987), a área mínima ideal para o dimensionamento do sistema varia entre 30 a 40 % em relação à área tota ocupada pela planta.

Segundo López et al. (1992), para cultivos com espaçamento largos, a porcentagem de área molhada deve ter um valor mínimo de 20% para regiões de clima de clima úmido, enquanto que em regiões de clima seco esta recomendação está entre 33 e 50 %.

Keller e Bliesner (1990) recomendam que a porcentagem de área molhada deve se situar entre 33 e 67% nas regiões de clima seco ou árido e em regiões onde se pratica a irrigação complementar, e de 20% em regiões de clima úmido. Segundo estes autores, estes percentuais de área molhada contribuem para a obtenção de índices ideais de uniformidade e de distribuição da água no solo.

2.2 Umidade do solo

Diversos são os métodos utilizados para a determinação da umidade do solo, que podem ser divididos em métodos diretos e indiretos. O método direto gravimétrico é considerado o método padrão para a determinação da umidade do solo e também para a calibração dos métodos que a determinam indiretamente. Dentre os principais métodos utilizados na determinação indireta da umidade do solo destacam-se o método da moderação de nêutrons (sonda de nêutrons) e da reflectometria no domínio do tempo (sonda de TDR).

O método gravimétrico, que é considerado o método padrão para a determinação de umidade do solo, se caracteriza por fornecer resultados exatos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial. Nas medidas no campo, a forma de coleta, o acondicionamento e o transporte das amostras podem reduzir a exatidão dos resultados, enquanto que a realização de amostragens repetidas em uma pequena área, pode danificar a área de estudo, impossibilitando a sua continuação. Outra desvantagem deste método é que a sua execução é muito demorada.

O uso da sonda de nêutrons exige um treinamento e licença especial para seu manuseio, principalmente pela presença da radiação gama. O bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas o elemento sensor sofre deterioração com o tempo devido a sua interação com os compostos químicos do solo (COELHO e OR, 1996).

No entanto, para medidas de umidade do solo em laboratório e em campo, a utilização da técnica da TDR apresenta importantes vantagens quanto ao uso, destacando-se a exatidão dos resultados e a possibilidade de serem realizadas leituras de umidade de forma repetitiva, sem que para tanto haja destruição da amostra de solo. Outros pontos vantajosos no seu uso é a ampla faixa de determinação da umidade e a segurança do método (COELHO e OR, 1996).

Porém as propriedades utilizadas por estes métodos não são unicamente dependentes do teor de água do solo, mas também da mineralogia, do teor de sais, da massa específica e da temperatura do solo. Estes fatores podem afetar o funcionamento dos equipamentos, afetando a qualidade da informação obtida para a umidade do solo. O estudo de novos métodos ou aparelhos de medição e a realização de uma calibração bem realizada dos equipamentos são expedientes que proporcionam a aplicabilidade destes métodos com eficiência e qualidade.

2.3 A técnica da TDR

A técnica da TDR (Time Domain Reflectometry) é um método direto e não destrutivo de medição de umidade e condutividade elétrica do solo, que vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros físicos do solo. Fellner-Feldegg (1969) desenvolveram a técnica da TDR para a medição da constante dielétrica em líquidos e, a partir de então, a técnica da TDR passou a ser utilizada para medidas de umidade do solo (SOUZA et al., 2006).

Davis e Annan (1977) avaliaram o comportamento da constante dielétrica, estudando os efeitos dos componentes do solo sobre as frequências das ondas eletromagnéticas, demonstrando que a parte real da constante dielétrica do solo (k') dependia mais do conteúdo de água do solo e menos da composição e da massa específica do solo. Topp et al. (1980) confirmaram estas hipóteses realizando estudos com onze diferentes tipos de solos e concluíram que o conteúdo de água do solo foi o parâmetro mais significativo nas variações da constante dielétrica do solo.

Estudos realizados por Topp e Davis (1985) demonstraram as vantagens da utilização da TDR em aplicações de campo e para avaliar o movimento de água no solo. Estes estudos possibilitam melhores análises teóricas do comportamento dielétrico dos solos (TOMMASELLI E BACCHI, 2001) e avaliações sobre as configurações das sondas de TDR (ZEGELIN et al., 1989) e de sistemas automatizados (HERKELRATH et al., 1991) e multiplexados (BAKER e ALLMARAS, 1990).

Herrmann (1993), que desenvolveu um equipamento de transmissão de microondas para determinar a umidade do solo, e Tommaselli e Bacchi (2001), que realizaram estudos de calibração da técnica de TDR para cinco diferentes tipos de solos, foram os primeiros a utilizarem estudos com esta técnica no Brasil.

A técnica da TDR tem como fundamento o efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em cabos condutores em contato com o solo. Este fenômeno se deve à diferença entre as constantes dielétricas (K , adimensional) da água, do ar e do material sólido do solo. Na matriz do solo, as constantes dielétricas dos seus componentes variam entre 1 e 81: o ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, enquanto a água apresenta o valor máximo 81 (NOBORIO, 2001). A constante K medida neste sistema ar-solo-água é denominada constante dielétrica aparente (K_a , adimensional). Assim, conhecendo-se esta variável, pode-se estimar a umidade volumétrica do solo por meio de calibrações obtidas a partir de dados de campo ou de

laboratório (SOUZA et al., 2004). Para a medição, são necessários, basicamente, um testador de cabo e um sensor com hastes metálicas (sonda) ligadas por um cabo coaxial.

A técnica da TDR, aliada ao desafio de se buscar o entendimento da infiltração e da distribuição da água para diferentes condições de manejo, pode resultar em benefícios para o dimensionamento da irrigação por gotejamento como, por exemplo, determinar o número de emissores adequados ao atingimento do percentual de área molhada ideal à cultura a ser irrigada. Assim, se pode equacionar um dos principais problemas da irrigação por gotejamento, pois o número de gotejadores determina o preço do sistema de irrigação e a sua rentabilidade econômica, tornando-a mais atrativa como ferramenta capaz de ampliar rendimentos do produtor sem causar prejuízos ao meio ambiente.

2.4 Modelos matemáticos para o dimensionamento do bulbo molhado

Além dos métodos diretos de campo, tem se procurado, também, determinar indiretamente o formato e as dimensões do bulbo molhado em função das propriedades físicas do solo utilizando-se os modelos matemáticos. Os modelos são complexos e o resultado obtidos nem sempre confiáveis, dada a heterogeneidade dos solos, mas, mesmo assim, já se chegou a algumas regras práticas. A mais importante é que o volume de solo úmido é diretamente proporcional ao volume de água aplicado e inversamente proporcional ao conteúdo inicial de água no solo. O diâmetro, conhecido também por extensão horizontal do bulbo molhado (d), está diretamente relacionado com a força capilar e com a raiz quadrada do tempo de aplicação de água, exceto se houver algum obstáculo natural ao movimento de água no solo. A extensão vertical (z) está diretamente relacionada com a extensão horizontal do bulbo, sendo que o produto de d por z é proporcional ao volume de água aplicado. Apesar destas regras gerais, mesmo assim é difícil prever qual pode ser o padrão de distribuição da água em um dado solo (SALLES, 1990).

Para um mesmo volume aplicado, o aumento da vazão implica um aumento do movimentação horizontal da água e uma diminuição da profundidade do bulbo molhado. À medida que se aumenta o volume de água aplicado, maior é o avanço da frente de molhamento, tanto em profundidade quanto lateralmente, aumentando dessa forma as dimensões do bulbo molhado (BRESLER et al, 1971).

Bresler (1978) desenvolveu uma aproximação para determinar o espaçamento entre gotejadores usando solução analítica para fluxo constante, enquanto Wooding (1968)

combinou informações hidráulicas de descarga de gotejadores e propriedades físicas do solo, o que possibilitou estimar o potencial mátrico desejável em função do rendimento da cultura.

Taghavi et al. (1984), propuseram um modelo para simular a infiltração bidimensional proveniente de uma fonte de água pontual. A inovação deste modelo foi a de simular o movimento da água, por meio de ambientes de solo seco, causando uma frente de molhamento abrupta, assim como sua aplicabilidade potencial em regiões de fluxo com contornos irregulares. Estas condições são comumente encontradas no campo e são difíceis de serem modeladas pelo método de diferença finita ou outros métodos numéricos.

Embora essas metodologias sejam estruturadas, várias desvantagens surgem, limitando a sua aplicabilidade para estudos teóricos. O uso rotineiro de modelos numéricos ou analíticos para o propósito de dimensionamento, ainda é considerado pouco prático devido à falta de informações das propriedades físicas do solo. Desta forma, os projetistas recorrem a modelos semiempíricos, os quais se baseiam na geometria do bulbo molhado produzido pelo emissor. Como exemplo, Schwartzman e Zur (1986) descreveram um modelo semi-empírico para a distribuição da água no solo a partir de uma simplificação da estimativa da geometria e do volume do bulbo molhado. Entretanto, mesmo as teorias mais simples necessitam serem alimentadas com dados coletados em campo, a partir de ensaios locais de caracterização do bulbo molhado.

Como dito, Schwartzman e Zur (1986) descreveram um modelo para a distribuição da água no solo baseado em uma simplificação para a estimativa da geometria e volume do bulbo molhado (Figura 1). Eles relacionaram variáveis chaves para a distribuição da água no solo, tais como, vazão do emissor, condutividade hidráulica saturada, volume total aplicado, profundidade vertical e diâmetro lateral do bulbo molhado.

A equação de fluxo da água de Richards é de difícil solução devido a sua dependência não linear da condutividade hidráulica, que é dependente da umidade do solo, porem pode ser resolvida utilizando-se métodos numéricos. Simunek et al. (1993) desenvolveram um modelo numérico geral capaz de resolver a equação de Richards para duas dimensões, conhecida como SWMS 2D, ou, mais recentemente, como HYDRUS-2D. Este modelo, que é baseado em elementos finitos incorporados a uma interface gráfica (propriedades do solo, condições atmosféricas, vazão do emissor, condições de contorno, etc.), fornece a visualização dos resultados simulados.

Genuchten e Simunek (2004) relataram que nas últimas décadas houve um grande aumento de modelos matemáticos capazes de modelar o movimento da água e dos solutos no solo. Com a crescente utilização dos modelos computacionais, o modelo

HYDRUS-2D, que é um software capaz de simular o movimento unidimensional de água, calor e solutos em um meio saturado variado, tem sido utilizado em diversos trabalhos, porém, ainda necessita ser avaliado em condições específicas de campo e laboratório.

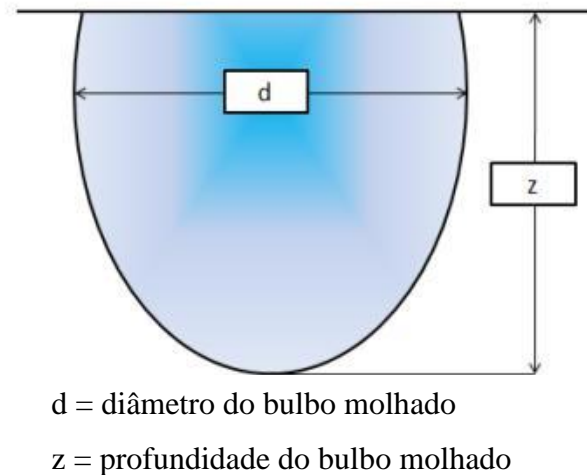


Figura 1. Ilustração das dimensões do bulbo molhado.

Segundo Skaggs et al. (2004), a utilização do modelo HYDRUS-2D é uma estratégia eficiente para estudar a prática de manejo ideal para a irrigação por gotejamento, porém, até então, foram realizados poucos trabalhos de simulações numéricas em que se utilizam dados de campo, deixando em dúvida as conclusões obtidas a partir da utilização de modelos matemáticos para o dimensionamento dos sistemas de irrigação por gotejamento.

2.5 Condutividade hidráulica do solo saturado

Segundo Carvalho (2003), a condutividade hidráulica do solo é um parâmetro hidráulico que traduz a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil do solo, sendo ela uma constante de proporcionalidade que caracteriza o meio poroso do perfil do solo quanto à percolação da água. Esta constante de proporcionalidade é utilizada na equação de Darcy, a qual estabelece que a quantidade de água que passa por unidade de tempo e de área através de um meio poroso é proporcional ao gradiente hidráulico.

Alguns fatores, como a textura do solo, influenciam a sua condutividade hidráulica, devido a sua grande correlação com outros fatores ou fenômenos que ocorrem no solo. As taxas de infiltração de água e a capacidade de retenção de água e nutrientes no solo são influenciadas pela sua composição granulométrica.

A determinação da condutividade hidráulica pode ser feita em condições de solo saturado, quando se obtém a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s), que é uma constante, ou, então, em condições de solo não saturado, quando se obtém a condutividade hidráulica em função da umidade, simbolizada por $K(\theta)$. As determinações de K_s e $K(\theta)$ podem ser realizadas tanto em laboratório quanto em campo. Dentre os métodos mais utilizados em laboratório, destacam-se os permeômetros de carga hidráulica constante ou de carga hidráulica decrescente. Os quais são utilizados para a determinação da condutividade hidráulica do solo saturado, ou seja, K_s . Sob as condições de campo, o método mais utilizado de estimativa em função da condutividade hidráulica saturada do solo é o método de perfil instantâneo.

A condutividade hidráulica determinada em laboratório pelo método do permeômetro é um método relativamente prático e rápido. Porém a sua realização requer muita atenção na coleta e na preparação das amostras indeformadas, ocasião em que devem ser tomados todos os cuidados para que a estrutura do solo não seja afetada, garantindo dessa forma a boa qualidade dos resultados obtidos no ensaio.

Outro método de obtenção da condutividade hidráulica em campo é o do perfil instantâneo, que, no geral, fornece resultados mais precisos que os obtidos com o uso de permeômetros. Como se não, o método do perfil instantâneo é de realização demorada e também trabalhosa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em uma casa de vegetação, do tipo arco-simples, de 20 m de comprimento, 6,40 m de largura e 3,0 m de altura (Figura 2), instalada na uma área experimental do Departamento de Ciências Agrárias, da Universidade de Taubaté, localizada no município de Taubaté, Estado de São Paulo. As coordenadas geográficas locais são as seguintes: latitude 23°01'55,25'' Sul; longitude 43°30'39,74'' Oeste e altitude de 571 metros.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Cwa, subtropical úmido.

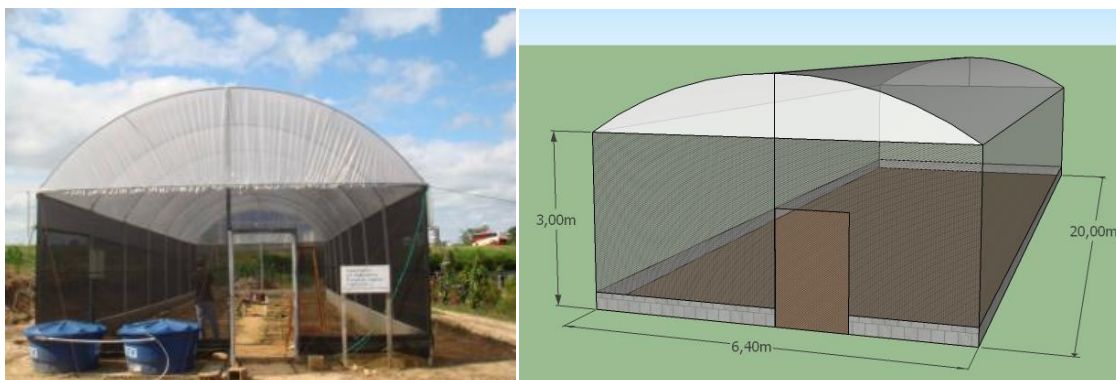


Figura 2. Casa de vegetação e sua ilustração com dimensões.

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (EMBRAPA, 2006), o solo encontrado na área experimental é um Latossolo Vermelho Amarelo, de textura média. As características físico-hídricas (Tabela 1) e a curva de retenção de água no solo (Tabela 2) foram obtidas utilizando-se amostras de solo indeformada, que foram coletadas nas camadas de 0,0 a 0,20 m; 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.

Tabela 1. Características físico-hídricas do solo da área experimental.

Camada de solo (m)	Parâmetros físico-hídricos						
	p (%)	Ds (g cm ⁻³)	Dp (g cm ⁻³)	VIB (mm h ⁻¹)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
0,00 – 0,20	51	1,30	2,70	13,20	59	13	28
0,20 – 0,40	50	1,35	2,70	9,40	57	13	30
0,40 – 0,60	49	1,39	2,70	9,50	58	13	29

CC = capacidade de campo; PMP = ponto de murcha permanente; p = porosidade total; Ds = massa específica do solo; Dp = massa específica da partícula; VIB = velocidade de infiltração básica.

Tabela 2. Curva de retenção de água no solo em umidade volumétrica (decimal).

Camada de solo (m)	Potencial matricial (kPa)									
	0	1	2	4	10	30	50	100	500	1500
0,00-0,20	0,43	0,39	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,29	0,26
0,20-0,40	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34	0,33	0,33	0,32	0,27	0,25
0,40-0,60	0,45	0,39	0,37	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,28	0,25

3.2. Equipamento de TDR

3.2.1 Construção das sondas de TDR

Para a realização do experimento foram utilizadas sondas de TDR construídas no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Taubaté, seguindo o procedimento descrito por Souza et al.; (2006). Cada sonda era constituída por três hastes paralelas contínuas de aço inoxidável (AISI 304: diâmetro de 3 mm), medindo 220 mm de comprimento. Um cabo coaxial (RG-58; 50 Ω; L = 5 m) com um conector BNC, foi soldado nas três hastes, sendo que o condutor externo do cabo foi ligado nas hastes externas e o cabo interno na haste central (Figura 3).

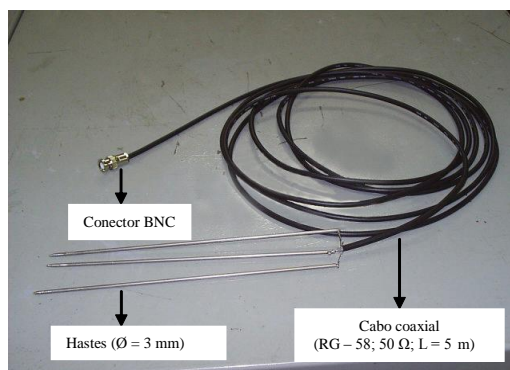


Figura 3. Armação das sondas de TDR.

A armação da sonda de TD, constituída pelas hastes metálicas e pelo cabo coaxial, foi colocada em um gabarito (Figura 4A) para recebimento do acabamento. Para tanto, foi utilizada resina epóxi para formar a base fixa da sonda, com o objetivo de promover a sustentação da estrutura da sonda, bem como delimitar o ponto inicial da sonda. Após 5 horas da aplicação da resina, as sondas adquiriram resistência suficiente e puderam ser retiradas do interior do gabarito (Figura 4B).

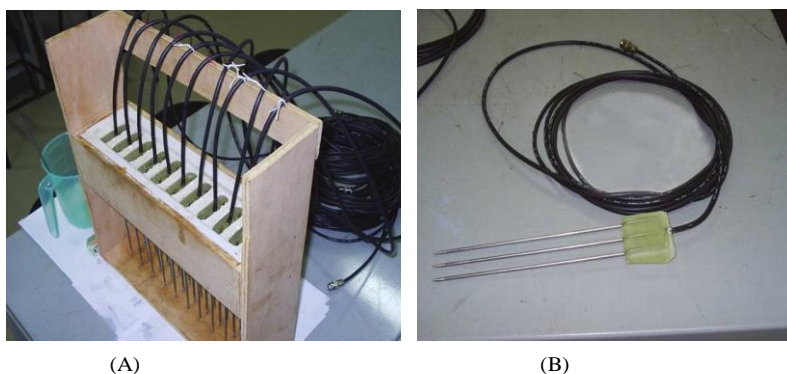


Figura 4. Gabarito para construção (A) da sonda de TDR (B).

3.2.2 Reflectômetro TDR 100

No monitoramento da umidade do solo foi utilizado o reflectômetro modelo TDR 100 (Campbell Scientific, Logan-Utah) apresentado na Figura 5, equipado com uma interface RS 232, que analisa automaticamente o sinal eletromagnético, e por um coletor de dados (CR1000 – Datalogger – Campbell Scientific).



Figura 5. Reflectômetro TDR 100.

Para estimar a umidade volumétrica (θ) do solo foi utilizada a equação de calibração proposta por Almeida. (2007):

$$\theta = 9 \times 10^{-5} K a^3 - 0,038 K a^2 + 0,0577 K a - 0,0484 \quad (1)$$

em que,

θ : umidade volumétrica do solo (adimensional)

Ka : constante dielétrica aparente do solo (adimensional).

3.3 Instalação das sondas de TDR na trincheira

Foram instaladas 150 sondas de monitoramento dentro de uma trincheira de 1,20 m x 1,20 m x 0,80 m (comprimento, largura e profundidade) aberta no interior da casa de vegetação (Figura 2), como mostrado na Figura 6. Utilizando-se uma trena, primeiramente foram marcados em uma das paredes da trincheira pontos distantes entre si de 0,10 m na direção vertical. Nesses pontos foram instaladas as seis primeiras sondas, formando a primeira coluna central, assumida como base para o alinhamento das demais sondas. Estas, por sua vez, também foram instaladas com o espaçamento de 0,10 m, porém na direção horizontal, formando-se nove colunas e seis linhas, sendo que as colunas das pontas tinham apenas quatro linhas, totalizando, desse modo, 50 sondas instaladas. Esse procedimento foi repetido para as outras duas paredes da trincheira.

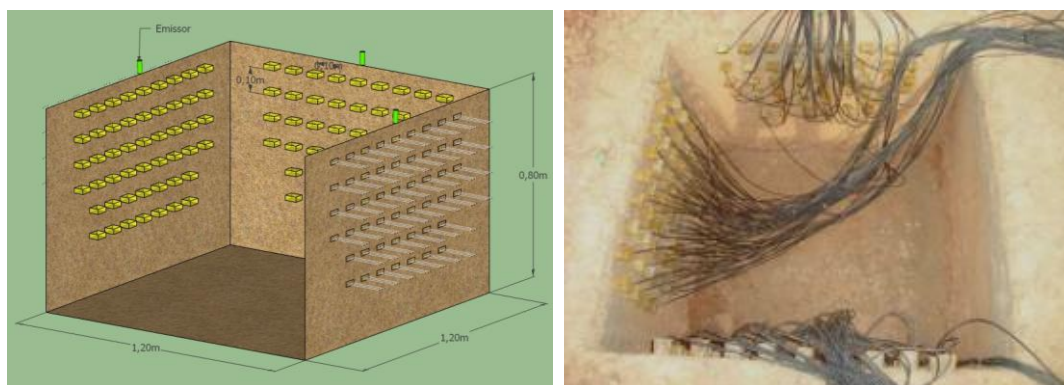


Figura 6. Ilustração e disposição das sondas na trincheira.

Após a instalação das sondas de monitoramento, a trincheira foi preenchida com o solo retirado quando da sua abertura. É importante destacar que as leituras de umidade somente foram realizadas após um período de 2 meses de repouso, considerado suficiente para a acomodação do solo na trincheira e para promover a interação das sondas com o solo.

3.4 Condução do experimento

O monitoramento do bulbo molhado no solo foi realizado através de 50 sondas de TDR em pequenos intervalos de tempo: antes da aplicação, após a infiltração e a cada trinta minutos após a infiltração.

As leituras de umidade do solo em todas as posições foram realizadas de forma contínua acompanhando os ciclos de irrigação, isto é, envolvendo a fase de infiltração e redistribuição da água no solo. Assim, observou-se a formação do bulbo molhado para as vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹ aplicando-se 1 L de água a cada 1 hora durante 10 aplicações.

Um sistema com um frasco de Mariotte (Figura 7) foi utilizado para manter a pressão nos gotejadores constante. Este procedimento descrito foi desenvolvido com base nos trabalhos de Souza et al. (2007).



Figura 7. Sistema com frasco Mariotte.

O monitoramento do ensaio foi facilitado devido à automação das sondas de TDR por meio de multiplexadores (Figura 8), possibilitando várias medições de umidade do solo em pequenos intervalos de tempo.

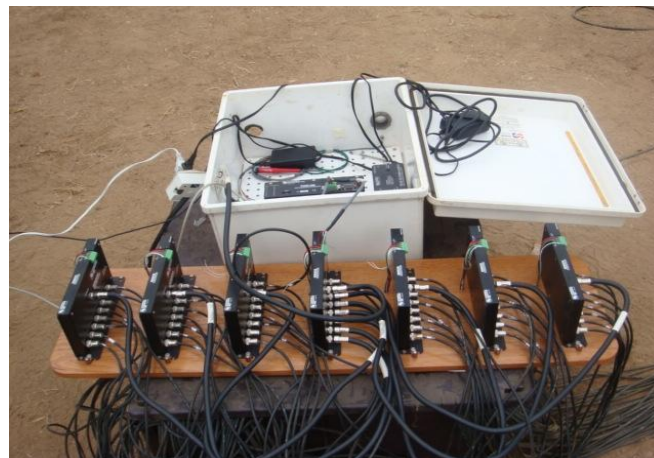


Figura 8. Detalhe dos multiplexadores.

Também foram medidas as dimensões do disco saturado formado ao redor do gotejador no momento da infiltração e o avanço da frente de umedecimento da superfície do solo (Figura 9). Desta forma pode-se avaliar a área superficial molhada em função do tempo e do volume de água aplicado.

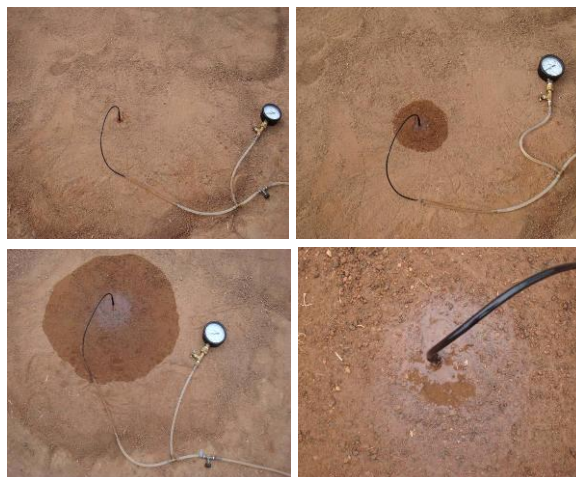


Figura 9. Processo da formação do disco saturado.

3.5 Medição do disco saturado e do avanço da frente de umedecimento

O desenvolvimento do disco saturado formado no momento da aplicação de água e o avanço da frente de umedecimento na superfície do solo (Figura 10) foram acompanhados utilizando-se uma trena (Figura 11). Para medição do diâmetro da frente de umedecimento foram utilizados pontos de referência no sentido vertical e horizontal, obtendo-se informações nos dois sentidos. Na medição do disco saturado obteve-se uma média dos diâmetros no sentido vertical e horizontal.

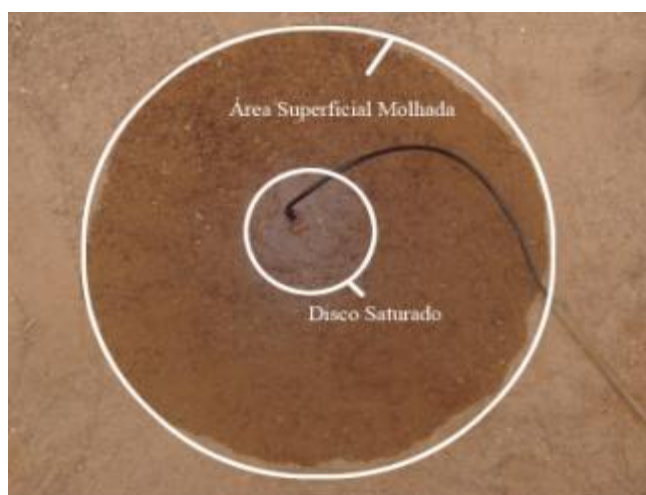


Figura 10. Formação do disco saturado e da frente de umedecimento.



Figura 11. Medição do disco saturado e da frente de umedecimento.

A coleta das dimensões do disco saturado foram importantes para a realização da simulação do bulbo molhado através da plataforma computacional HYDRUS-2D.

3.6 Modelos matemáticos utilizados

3.6.1 Modelo Schwartzman & Zur (1986)

Schwartzman & Zur (1986) desenvolveram um modelo simplificado para descrever o avanço da frente de umedecimento. Eles assumiram que o avanço da frente de umedecimento no solo depende de três variáveis básicas, a saber, a vazão do emissor (q ; L/h), a condutividade hidráulica do solo saturado (K_s ; $m\ h^{-1}$) e o volume total de água aplicado (V ; L). De acordo com este modelo, a profundidade vertical (z ; m) e diâmetro lateral (d ; m) do bulbo molhado são estimados com base nas seguintes funções:

$$d = f_1(V, q, K_s) \quad (2)$$

$$z = f_2(V, q, K_s) \quad (3)$$

Para o caso de fluxo cilíndrico (aplicação pontual) Schwartzman & Zur (1986) propuseram as seguintes formas adimensionais das variáveis V, z e d:

$$d^* = d \cdot \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$z^* = z \cdot \left(\frac{K_s}{q} \right)^{1/2} \quad (5)$$

$$V^* = V \cdot \left(\frac{K_s}{q} \right)^{3/2} \quad (6)$$

em que,

d^* , z^* e V^* : valores adimensionais do diâmetro, da profundidade do bulbo molhado e do volume aplicado, respectivamente;

V: Volume de água aplicada (L)

z e d: valores dimensionais verificados experimentalmente (m);

K_s : condutividade hidráulica do solo saturado (m/h);

q: vazão do gotejador (L/h).

Os parâmetros z^* e d^* são definidos pelo parâmetro adimensional V^* , conforme as seguintes equações:

$$d^* = A_1 \cdot (V^*)^{n_1} \quad (7)$$

$$z^* = A_2 \cdot (V^*)^{n_2} \quad (8)$$

em que,

A_1 , A_2 , n_1 , n_2 : constantes empíricas válidas para caso de fluxo cilíndrico (aplicação pontual).

Sendo assim, para o fluxo cilíndrico, as equações para cálculo dos valores dimensionais de z e d, com o auxílio das variáveis dimensionais V, K_s e q e das constantes empíricas A_1 , A_2 , n_1 e n_2 assumem as seguintes formas:

$$d = A_1 \cdot V^{n_1} \cdot \left(\frac{K_s}{q} \right)^{\frac{3}{2}n_1 - \frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$z = A_2 \cdot V^{n_2} \cdot \left(\frac{K_s}{q} \right)^{\frac{3}{2}n_2 - \frac{1}{2}} \quad (10)$$

cujos termos foram definidos anteriormente.

3.6.2 HYDRUS-2D

Simunek et al. (1993) desenvolveram o software computacional HYDRUS-2D, que é baseado na equação de Richards (1931) para o fluxo unidimensional expresso pela seguinte equação diferencial:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} - K(\Psi) \right] \quad (11)$$

em que,

θ – teor de umidade volumétrica do solo ($m^3 \cdot m^{-3}$)

t – tempo (s)

C – capacidade específica (adimensional)

Ψ – potencial total da água no solo, Pa;

Z – profundidade do solo (m)

K – condutividade hidráulica do solo ($m \cdot s^{-1}$)

O software permite também a utilização do modelo matemático desenvolvido por van Genuchten (1980), que relaciona a umidade volumétrica do solo com o seu potencial matricial:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha |\Psi|^n)]^m} \quad (12)$$

em que,

θ - umidade volumétrica ($m^3 \cdot m^{-3}$);

θ_r - umidade residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

θ_s - umidade no ponto de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$);

α , n e m - parâmetros empíricos.

O modelo HYDRUS-2D é baseado em elementos finitos, onde há a necessidade do conhecimento de variáveis como: propriedade do solo, condições atmosféricas, vazão do emissor e condições de contorno. O HYDRUS-2D também incorpora uma interface onde é possível a visualização gráfica das simulações realizadas.

Com este modelo, foram realizadas simulações para estimar a frente de molhamento no perfil do solo, utilizando-se as mesmas condições do experimento realizado em campo e para as três vazões estudadas. Para a simulação do fluxo de água no solo a partir de uma fonte pontual foram inseridas informações do experimento de campo, como o tempo de aplicação de água

3.6.2.1 Preparação do modelo HYDRUS-2D

Para a realização das simulações relativas a formação do bulbo molhado foi utilizado o software HYDRUS-2D, cuja tela inicial está apresentada na Figura 12. Nesta tela pode ser verificado que o software permite a realização de diferentes tipos de simulações, tais como sobre o fluxo de água, transporte de calor, transporte de solutos e absorção de água pelas raízes. No caso deste trabalho foi escolhida a opção de simulação de Fluxo de Água (Water Flow).



Figura 12. Tela inicial do software HYDRUS-2D.

Para sua operacionalização, o software precisa ser abastecido com as informações solicitadas na Figura 13. No caso desta pesquisa, foi definido que o fluxo de água na formação do bulbo molhado é do tipo eixo-simétrico, ou seja, possui simetria em relação ao seu eixo vertical. Também foi informado ao software que a unidade de medida de comprimento é o metro (m) e que a forma geométrica da simulação selecionada foi do tipo “geral”. O software permite, ainda, a inserção de informações sobre o perfil do solo e, no caso deste trabalho, foi informado que o mesmo apresenta heterogeneidade quanto ao tipo de material e que o balanço de massa foi realizado para três camadas de solo, cujas características físico-hídricas estão apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

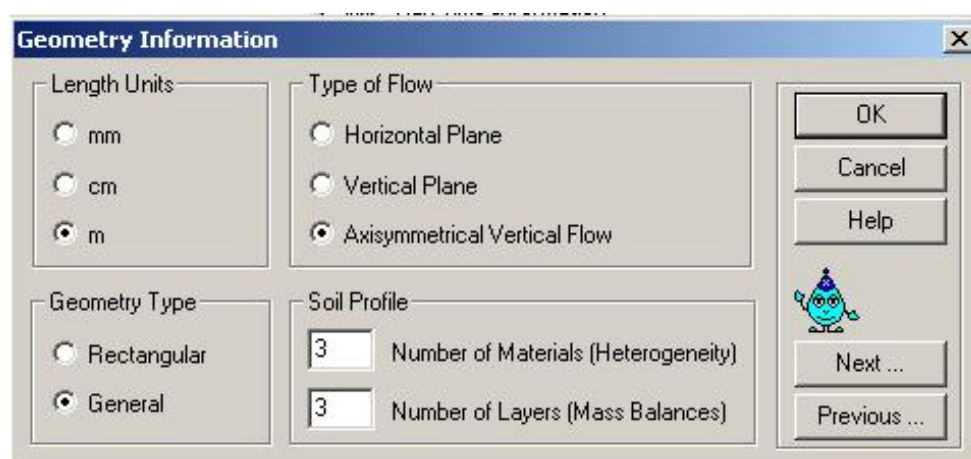


Figura 13. Tela de informações geométricas requeridas pelo software HYDRUS-2D.

Para alimentar o modelo, foram informadas as características temporais do experimento solicitadas na Figura 14. A duração das aplicações de água adotada foi de 10 horas, sendo que o intervalo de tempo foi calculado com base na aplicação de um litro de água por meio de um gotejador com vazão de 8 L h^{-1} , pois este representava o menor período de aplicação de água entre os gotejadores utilizados. Também foi informado ao software que a unidade de tempo utilizada foi a hora.

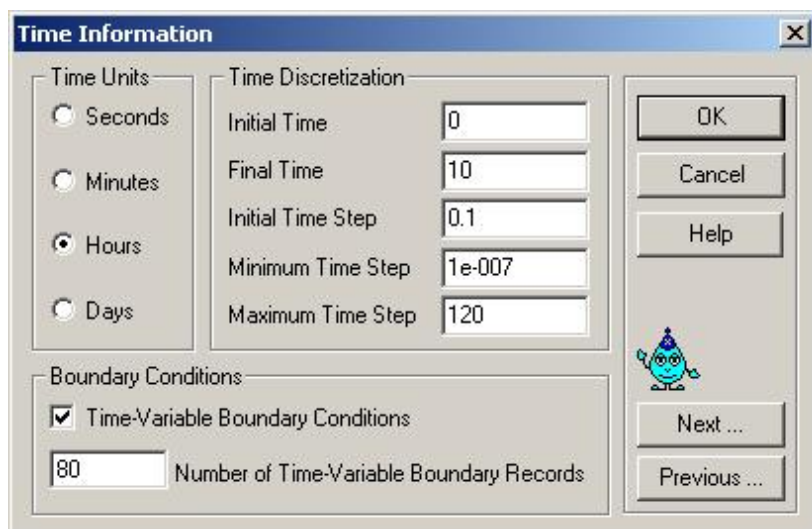


Figura 14. Tela de Informações temporais requeridas pelo software HYDRUS-2D.

Para a simulação foi definido um número máximo de 20 iterações (Figura 15) e adotando a condição inicial “em umidade”.

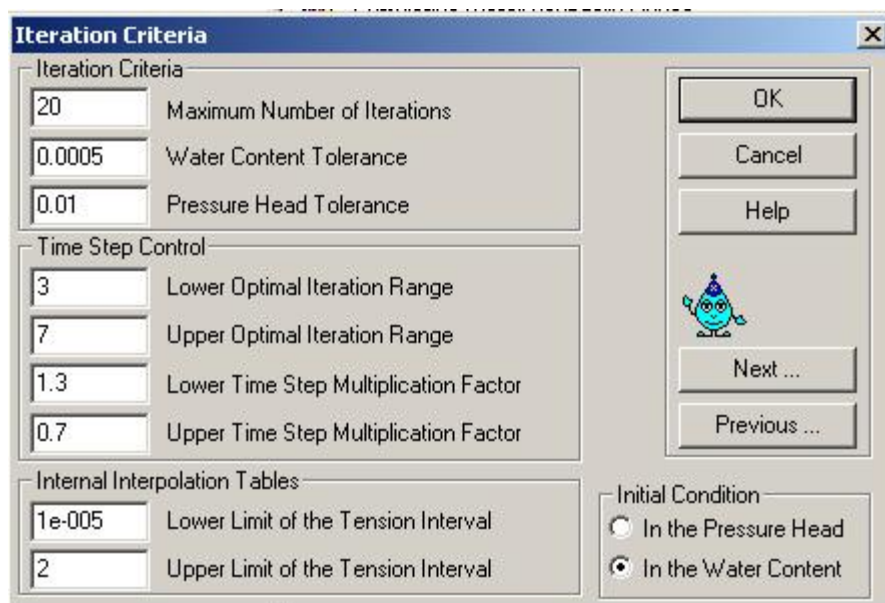
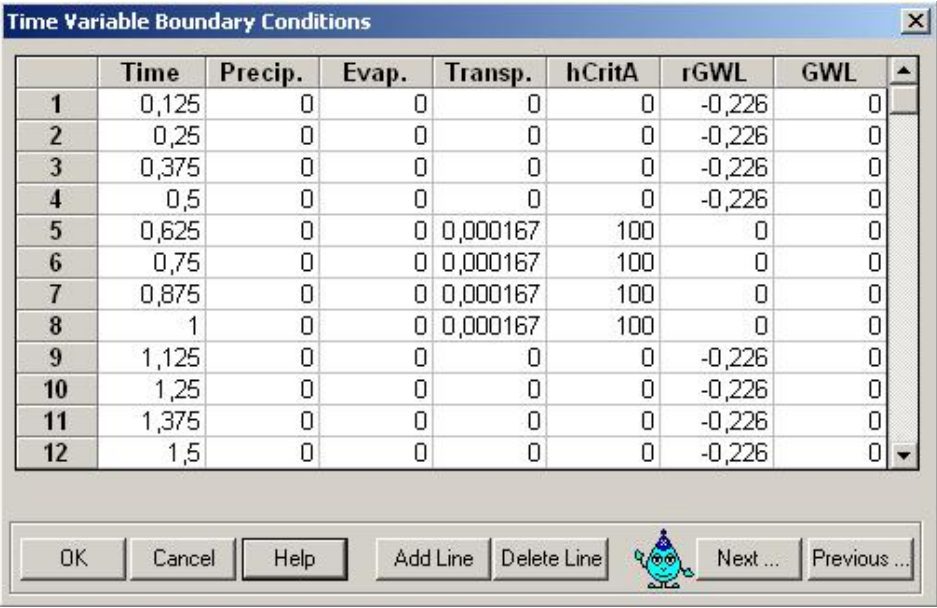


Figura 15. Tela dos critérios de iterações requeridos pelo software HYDRUS-2D.

As condições de contorno da variável tempo também foram inseridas, conforme apresentado na Figura 16. Para cada intervalo de tempo foi inserida as variáveis solicitadas a partir das observações realizadas durante o experimento, tais como fluxo de drenagem, que foi determinado a partir de observações de área saturada formada durante o processo experimental. E outras variáveis adotadas pelo padrão do

software como potencial de transpiração e valor absoluto da carga de pressão mínima permitida na superfície do solo também foram informadas.



	Time	Precip.	Evap.	Transp.	hCritA	rGWL	GWL
1	0,125	0	0	0	0	-0,226	0
2	0,25	0	0	0	0	-0,226	0
3	0,375	0	0	0	0	-0,226	0
4	0,5	0	0	0	0	-0,226	0
5	0,625	0	0	0,000167	100	0	0
6	0,75	0	0	0,000167	100	0	0
7	0,875	0	0	0,000167	100	0	0
8	1	0	0	0,000167	100	0	0
9	1,125	0	0	0	0	-0,226	0
10	1,25	0	0	0	0	-0,226	0
11	1,375	0	0	0	0	-0,226	0
12	1,5	0	0	0	0	-0,226	0

Figura 16. Tela das condições de contorno requeridas pelo software HYDRUS-2D.

Foi utilizada a plataforma Rosetta Lite v.1.0 para a estimativa dos parâmetros do modelo de van Genuchten (GENUCHTEN, 1980). Para tanto, foram utilizadas informações sobre as características físicas do solo da área experimental, como a massa específica do solo e as porcentagens de areia, silte e argila relativas às diferentes camadas do perfil do solo estudadas (Figura 17).

	Or	Qs	Alpha	n	Ks	l
1	0,08	0,483	3,22	1,307	0,186	0,2
2	0,0787	0,4563	2,08	1,3703	0,186	0,4
3	0,0775	0,455	2,09	1,3771	0,186	0,6

Soil Catalog Temperature Dependence




Figura 17. Tela dos parâmetros do modelo van Genuchten requeridos pelo software HYDRUS-2D.

Para continuar o processo de simulação do ensaio, foi desenhada a trincheira em seção transversal utilizando as dimensões reais, enquanto que o aplicativo MESHGEN-2D (Figura 18) foi utilizado para definir e criar a malha triangular, necessária à realização da simulação. O MESHGEN-2D, que é um aplicativo do Windows integrado ao software HYDRUS-2D, é utilizado para criar curvas de limite de domínios computacionais para a modelagem numérica em Mecânica dos Meios Contínuos. A interface simples deste módulo, juntamente com muitas opções e ferramentas permitem a entrada de dados de praticamente qualquer região bidimensional em pouco tempo apenas clicando com botões do mouse.

O módulo de MESHGEN-2D é também utilizado para diferenciar o domínio bidimensional com a ajuda de malha triangular não estruturada. O algoritmo usado é geral e pode ser usado para qualquer região bidimensional consistente com as regras descritas acima.

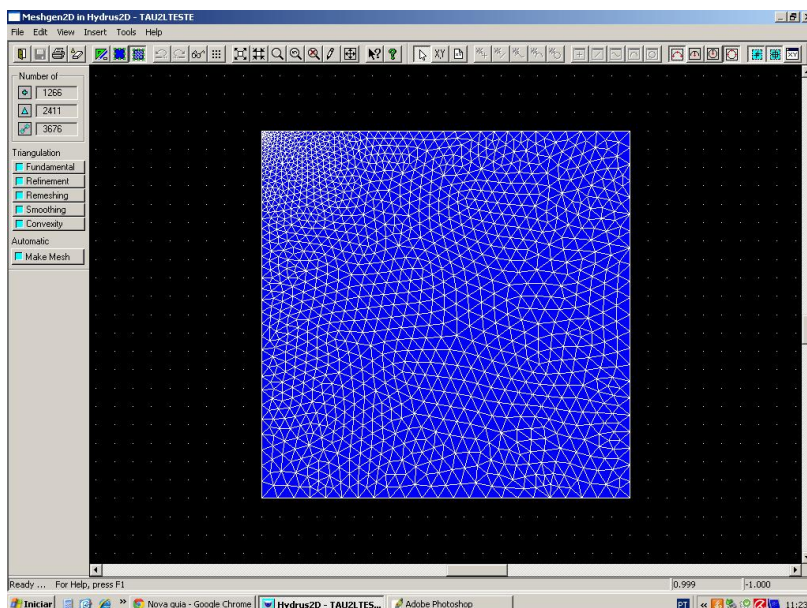


Figura 18. Tela do aplicativo formando a malha triangular.

A simulação do bulbo molhado utilizando o HYDRUS-2D consiste na utilização dos discos saturados como fonte da entrada de água no sistema de simulação. Houve a necessidade de coletar as dimensões da poça saturada para cada vazão estudada durante o ensaio de monitoramento. Utilizou-se um raio médio de disco saturado para cada vazão e foram inseridas no software na guia de Condições de Contorno (Figura 19) como fluxo variável.

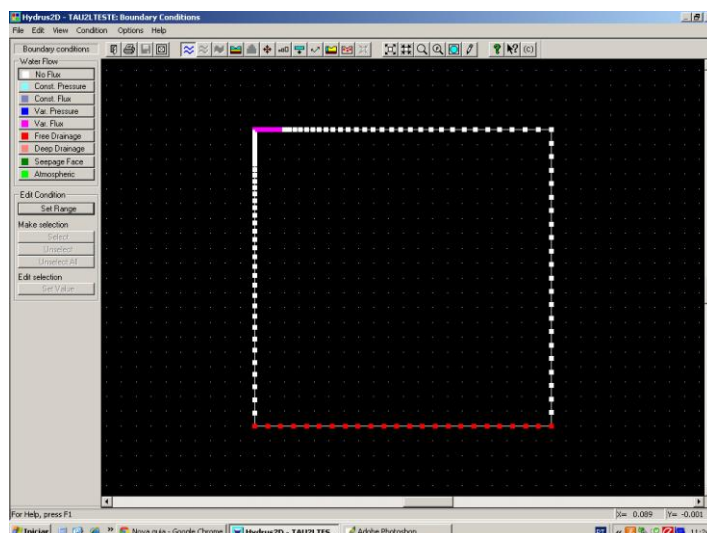


Figura 19. Tela de inserção do disco saturado requerido pelo software HYDRUS-2D.

Também nas condições de contorno, foi necessário definir as três diferentes profundidades de camadas analisadas para tornar a simulação mais próxima às condições reais do experimento (Figura 20), onde em cada profundidade foram inseridas as características físicas anteriormente citadas na Tabela 1 neste trabalho.

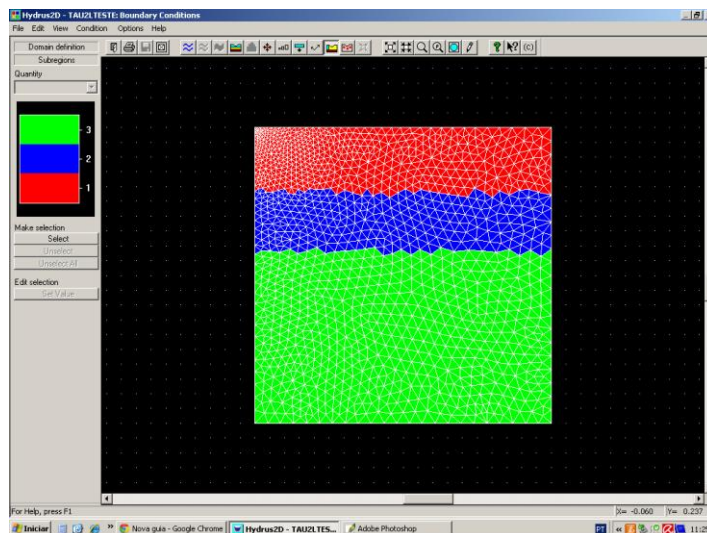


Figura 20. Tela de divisão das três profundidades analisadas.

Após a preparação do software para simular a formação do bulbo molhado sob as condições encontradas no ensaio, o programa inicia a simulação compilando as iterações para cada tempo definida (Figura 21).

Time	ItW	ItCum	CumAtmBC	CumConst	CumDrain	hAtm	hConst	hDrain
.0014	4	342	.000E+00	.000E+00	.125E-13	0.	0.	-.846.
.0015	4	346	.000E+00	.000E+00	.137E-13	0.	0.	-.846.
.0017	4	350	.000E+00	.000E+00	.150E-13	0.	0.	-.846.
.0018	4	354	.000E+00	.000E+00	.162E-13	0.	0.	-.846.
.0020	4	358	.000E+00	.000E+00	.175E-13	0.	0.	-.846.
.0021	4	362	.000E+00	.000E+00	.188E-13	0.	0.	-.846.
.0022	4	366	.000E+00	.000E+00	.200E-13	0.	0.	-.846.
.0024	4	370	.000E+00	.000E+00	.213E-13	0.	0.	-.846.
.0025	4	374	.000E+00	.000E+00	.226E-13	0.	0.	-.846.
.0026	4	378	.000E+00	.000E+00	.238E-13	0.	0.	-.846.
.0028	4	382	.000E+00	.000E+00	.251E-13	0.	0.	-.846.
.0029	4	386	.000E+00	.000E+00	.264E-13	0.	0.	-.846.
.0031	4	390	.000E+00	.000E+00	.276E-13	0.	0.	-.846.
.0032	4	394	.000E+00	.000E+00	.289E-13	0.	0.	-.846.
.0033	4	398	.000E+00	.000E+00	.301E-13	0.	0.	-.846.
.0035	4	402	.000E+00	.000E+00	.314E-13	0.	0.	-.846.
.0036	4	406	.000E+00	.000E+00	.327E-13	0.	0.	-.846.
.0038	4	410	.000E+00	.000E+00	.339E-13	0.	0.	-.846.
.0039	4	414	.000E+00	.000E+00	.352E-13	0.	0.	-.846.
.0040	4	418	.000E+00	.000E+00	.365E-13	0.	0.	-.846.
.0042	4	422	.000E+00	.000E+00	.377E-13	0.	0.	-.846.
.0043	4	426	.000E+00	.000E+00	.390E-13	0.	0.	-.846.
.0044	4	430	.000E+00	.000E+00	.402E-13	0.	0.	-.846.
.0046	3	433	.000E+00	.000E+00	.415E-13	0.	0.	-.846.
.0048	5	438	.000E+00	.000E+00	.432E-13	0.	0.	-.846.
.0049	4	442	.000E+00	.000E+00	.448E-13	0.	0.	-.846.
.0051	4	446	.000E+00	.000E+00	.464E-13	0.	0.	-.846.
.0053	5	451	.000E+00	.000E+00	.481E-13	0.	0.	-.846.
.0055	4	455	.000E+00	.000E+00	.497E-13	0.	0.	-.846.

Figura 21. Tela da Execução da simulação no software HYDRUS-2D.

3.7 Análise estatística

As estimativas dos parâmetros do bulbo molhado obtidas com a aplicação dos modelos matemáticos Schwartzman-Zur Reproduzido e HYDRUS-2D (zH, dH, zSZ e dSZ) foram comparadas com as informações coletadas em condições de campo por meio de análise de regressão.

A hierarquização dos modelos estudados foi feita em base nos valores do coeficiente de determinação (R^2) e angular (b) das respectivas equações de regressão linear, do erro padrão da estimativa (SEE) e do índice de ajuste de Willmott (d).

O modelo matemático de melhor desempenho na estimativa dos parâmetros coletados no campo foi aquele que apresentou maior R^2 , menor SEE e valores de d e b próximos da unidade.

Segundo Allen et al. (1989), o erro padrão da estimativa (SEE), pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$SEE = \left[\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

em que,

SEE – erro padrão da estimativa.

y – variável observada no campo.

\hat{y} – variável estimada pelo modelo.

n – número de observações.

O índice de ajuste (d) foi proposto por Willmott (1981) e é utilizado para avaliar a concordância com que os valores observados são estimados pelas simulações matemáticas. Para o seu cálculo foram utilizadas as equações apresentadas a seguir:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \quad (14)$$

$$P'_i = P_i - \bar{O} \quad (15)$$

$$O'_i = O_i - \bar{O} \quad (16)$$

em que,

d - índice de ajuste é um adimensional variando entre 0 e 1, sendo que $d=1$ mostra completo ajustamento entre os valores observados e os estimados, enquanto $d=0$ representa para a condição oposta.

P_i – valores estimados de zH , dH , zSZ e dSZ ;

O_i – valores observados de z e d .

\bar{O} – média dos valores observados de z e d .

n – número de observações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Disco saturado versus área superficial molhada

Os discos saturados se estabilizaram após a 4ª aplicação de água no solo quando foram utilizadas vazões de 2 e 8 L h⁻¹ (Figuras 22 e 24), enquanto que, no caso da vazão de 4 L h⁻¹, houve um aumento contínuo dos mesmos desde a 1ª até a 10ª aplicação de água (Figura 23). Na fase inicial do processo de infiltração da água no solo, os raios dos discos saturados foram de 2,25 cm, 1,75 cm e 6,25 cm, atingindo valores máximos de 8,75 cm, 11,5 cm e 11,5 cm, respectivamente, para as vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹.

Analisando a Figura 2, pode ser verificado que inicialmente o raio do disco saturado da vazão de 8 L h⁻¹ atingiu um valor maior do que os raios obtidos com as demais vazões, porém, quando estabilizado, o seu valor foi igual ao observado para vazão de 4 L h⁻¹.

No tocante ao avanço da frente de molhamento, pode ser observado nas Figuras 22,23 e 24 que no início do processo de infiltração o seu raio foi de 14 cm, 16 cm e 14 cm, atingindo os valores de 34 cm, 35 cm e 34 cm ao final do processo de infiltração, respectivamente, para as vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹.

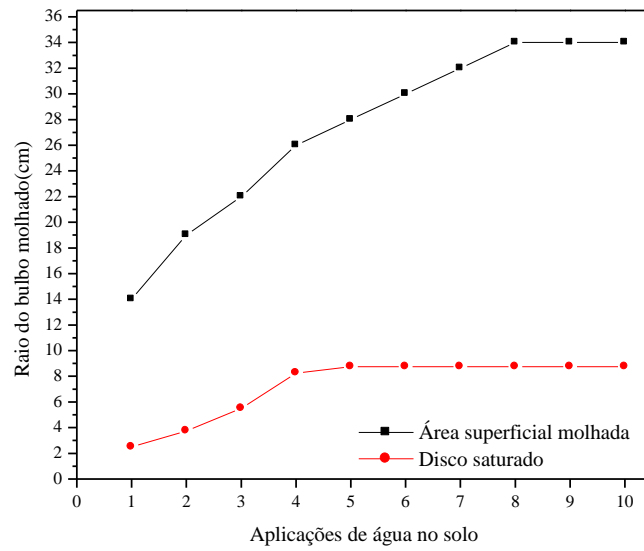


Figura 22. Raio do bulbo molhado observado após as aplicações de 2 L h⁻¹.

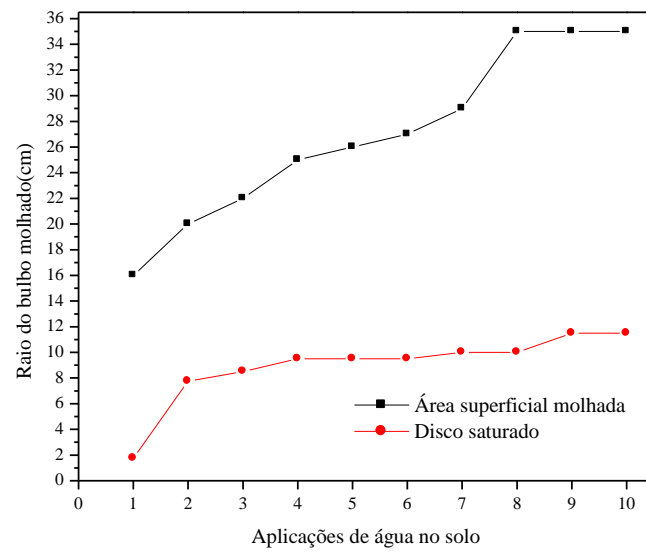


Figura 23. Raio do bulbo molhado observado após as aplicações de 4 L h⁻¹.

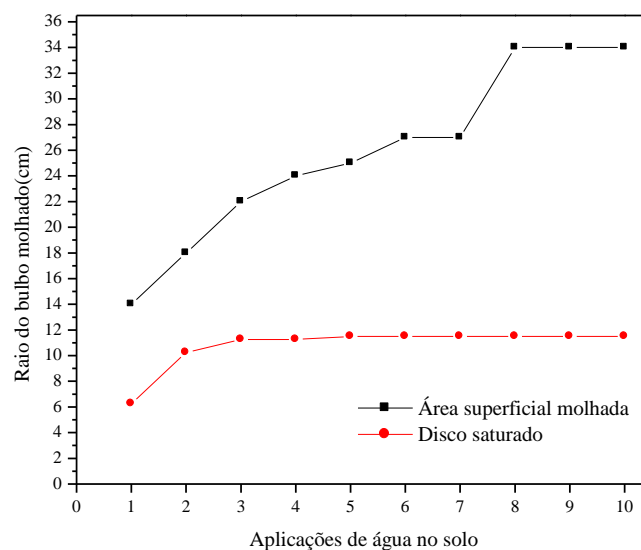


Figura 24. Raio do bulbo molhado observado após as aplicações de 8 L h^{-1} .

Os resultados apresentados demonstram que a vazão dos gotejadores e as propriedades físicas do solo exercem efeito diferenciado no formato do bulbo molhado e no disco saturado. Aumentando-se a vazão do gotejador de 2 L h^{-1} para 4 L h^{-1} , de forma geral, observou-se o aumento do raio horizontal, devido à alteração da área de infiltração da água aplicada. Estes resultados concordam com os obtidos por Souza et al. (2009) em ensaios de laboratório, os quais relataram que a aplicação de água contínua no solo via gotejamento promovem um aumento no raio superficial horizontal do bulbo molhado. Essas informações sobre o disco saturado e a frente de molhamento são importantes para auxiliar no dimensionamento e manejo do sistema de irrigação por gotejamento.

Com base nos dados experimentais obtidos neste trabalho (Figuras 22, 23 e 24) determinou-se que as porcentagens de área molhada nas condições estudadas foram, respectivamente, de 21, 25 e 17% para as vazões aplicadas de 2 , 4 e 8 L h^{-1} . Estes valores são inferiores aos propostos por Keller e Bliesner (1990), que recomendam uma porcentagem de área molhada de 33% para regiões de clima úmido, onde parte das necessidades de água das culturas é fornecida pela chuva, e solos de textura média e pesada.

4.2 Distribuição e armazenamento de água no solo

Segundo os resultados experimentais de umidade obtidos com as leituras do aparelho de TDR, devidamente representados nas Figuras 26,27 e 28, foi observado que nas primeiras aplicações de água que os teores de água no perfil do solo mostraram-se simétricos em relação aos eixos vertical e horizontal. Entretanto, com a continuidade das aplicações de água no solo, se observou um aumento gradativo dos teores de umidade enquanto a frente de umedecimento evoluía. Observou-se, também, um maior armazenamento de água próximo ao gotejador e, conseqüentemente, uma diminuição desta, à medida que se aproxima da frente de molhamento, resultados semelhantes foram encontrados por Lopes et al. (2009) em ensaios de campo com o mesmo tipo de solo.

Na Figura 25, estão apresentados os perfis de umidade do solo para a vazão de 2 L h^{-1} , resultantes de 10 aplicações de água a cada hora. Verifica-se que nas primeiras aplicações houve simetria na evolução do bulbo no sentido vertical em relação ao horizontal no perfil do solo, ocorrendo um maior aumento no sentido vertical somente após a 5ª aplicação. Observa-se, ainda que durante as 10 aplicações nesta vazão (2 L h^{-1}) não foi ultrapassada a profundidade de 0,40 m.

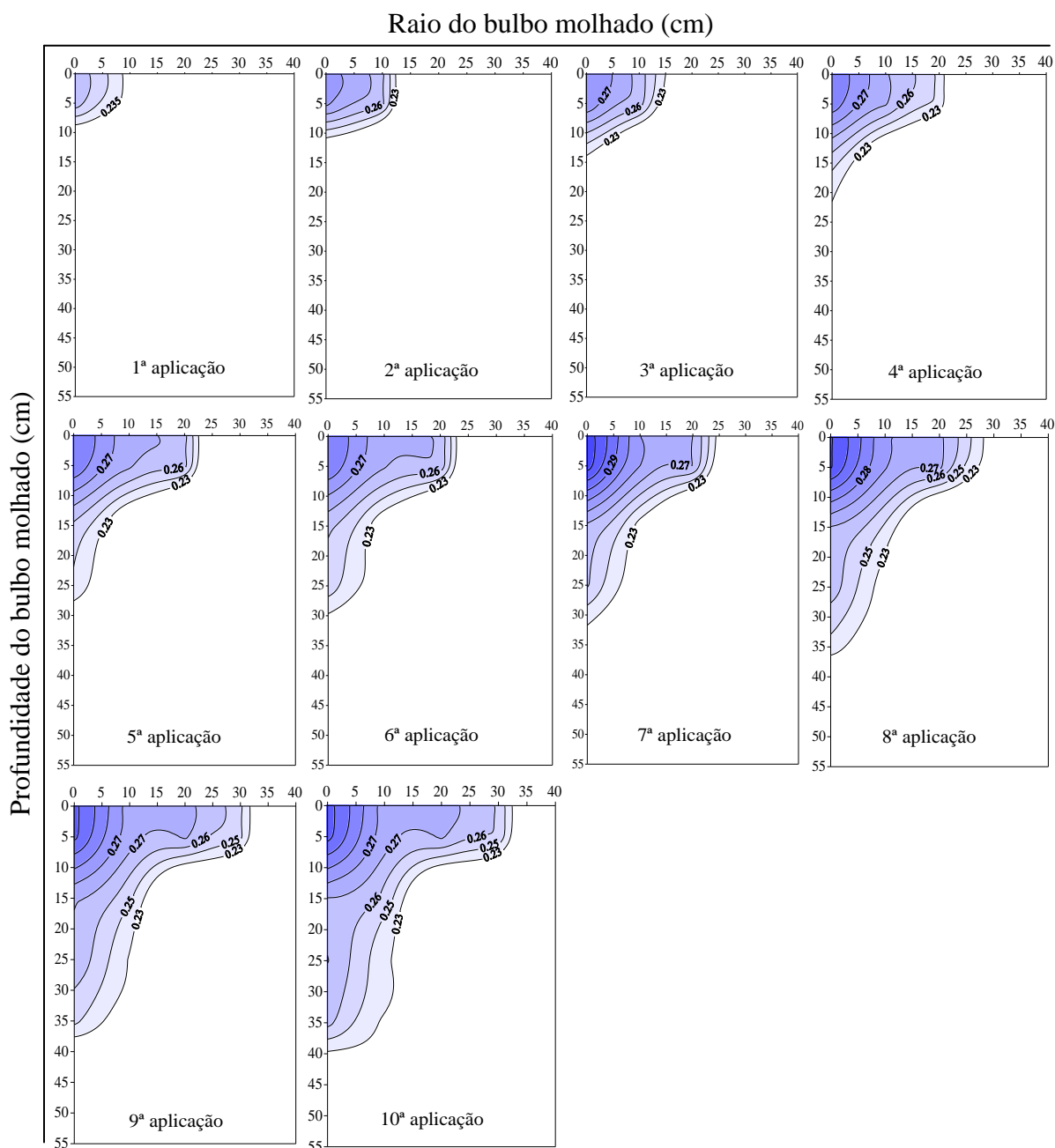


Figura 25. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de água para a vazão de 2 L h^{-1} .

Na Figura 26 estão apresentados os perfis de umidade do solo para vazão de 4 L h^{-1} que, se comparados à vazão de 2 L h^{-1} , apresentam uma mobilidade vertical evoluindo em menor proporção, não ultrapassando a profundidade de $0,23 \text{ m}$ após a 10^{a} aplicação. Porém, no sentido horizontal, a frente de umedecimento aumentou rapidamente, podendo ser verificado que, após a 4^{a} aplicação, ela se manteve no intervalo entre $0,25 \text{ m}$ e $0,33 \text{ m}$ até a 10^{a} aplicação de água.

Comparando os bulbos de umidade percebe-se que com a aplicação do dobro da vazão (de 2 para 4 L h^{-1}) foram obtidas as maiores dimensões do bulbo

molhado no sentido horizontal e diminuição no sentido vertical. Estes resultados corroboram as observações feitas por Lopes et al. (2009) para as mesmas vazões e tipo de solo e com resultados obtidos por Souza et al (2009). Estes autores verificaram em ensaios de laboratório que se aumentando a vazão do gotejador ocorreu um aumento do raio horizontal, enquanto que, com a diminuição da vazão, ocorreu um aumento raio vertical do bulbo molhado, devido à alteração da área de infiltração da água aplicada. Esses autores relataram m que um aumento na vazão do gotejador resultou em um acréscimo no movimento horizontal e uma expansão menor no movimento vertical da água no bulbo.

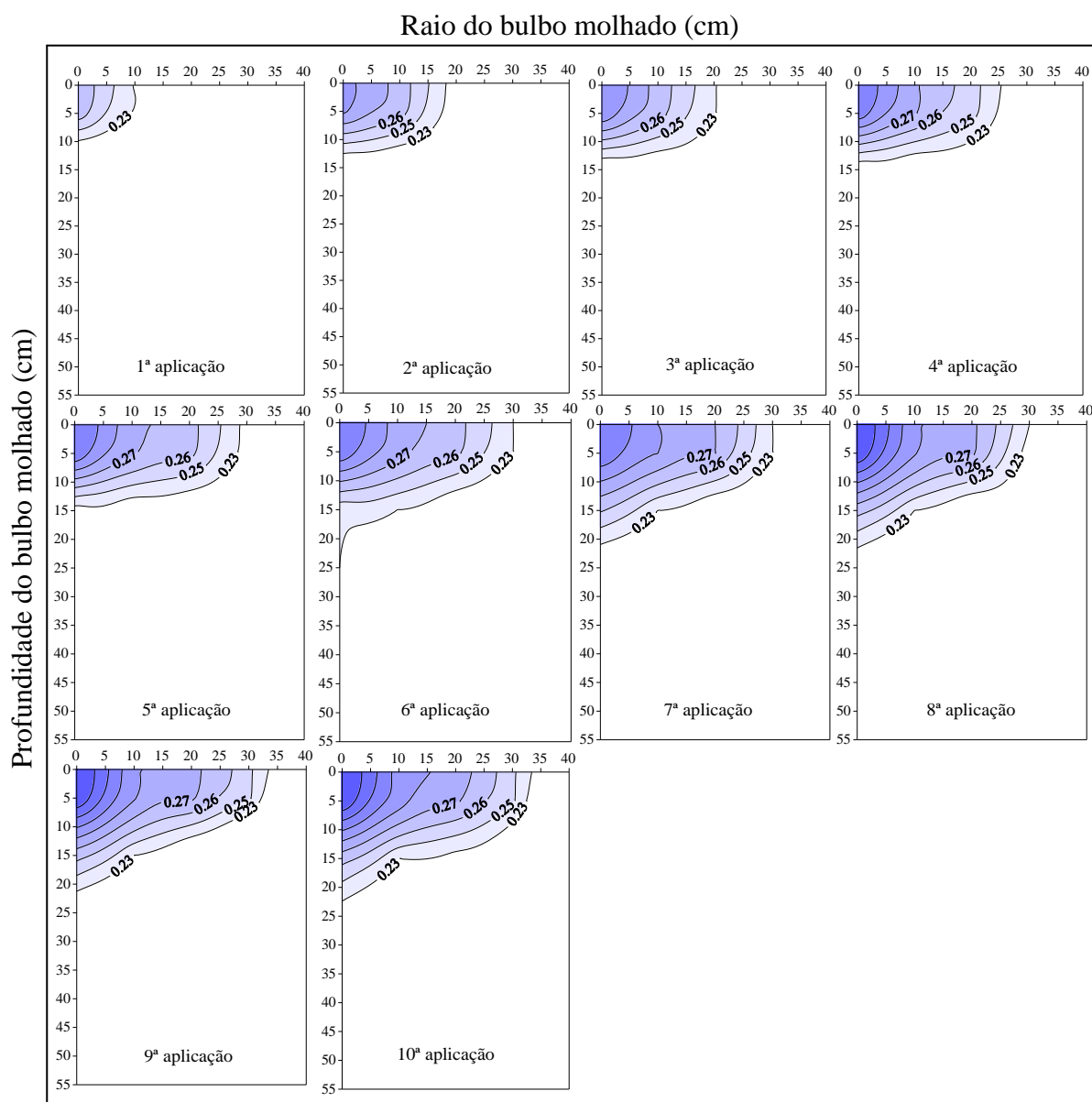


Figura 26. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de água para vazão de 4 L h^{-1} .

Nos perfis de umidade dos bulbos na vazão de 8 L h^{-1} (Figura 27) verificou-se uma semelhança quanto ao movimento da água nos eixos vertical e horizontal. Nesta vazão houve uma distribuição da umidade semelhante a dos bulbos de 4 L h^{-1} , porém com uma maior evolução vertical, mostrando-se, assim, intermediário entre os bulbos de umidade de 2 L h^{-1} e 4 L h^{-1} . Souza et al. (2006) em experimento realizado em laboratório para as mesmas vazões (2, 4 e 8 L h^{-1}) encontrou também na vazão de 8 L h^{-1} uma mescla entre as vazões de 2 e 4 L h^{-1} .

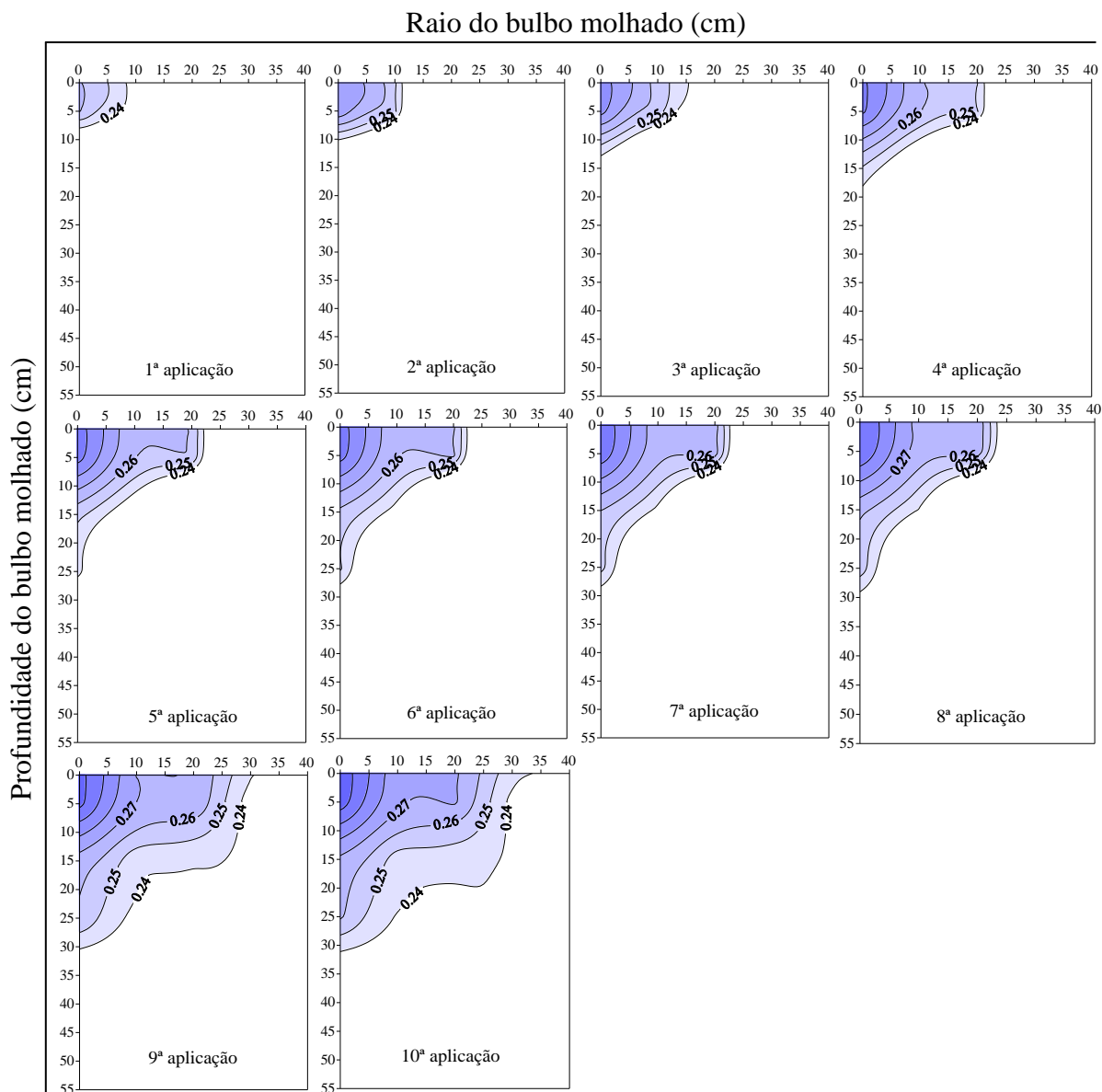


Figura 27. Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de água para vazão de 8 L h^{-1} .

4.3 Correlações entre os parâmetros adimensionais do modelo Schwartzman-Zur Reproduzido

Na Tabela 3 constam os valores experimentais dimensionais de vazão (q) do gotejador, diâmetro do bulbo molhado (d) e profundidade (z) do bulbo molhado observados sob diferentes volumes de água aplicada (V), bem como os respectivos valores adimensionais. Utilizando as equações (2), (3) e (4) propostas por Schwartzman e Zur (1986) foram obtidos os valores adimensionais de d^* , z^* e V^* , relativos a uma condutividade hidráulica saturada (K_s) de $0,186 \text{ m h}^{-1}$.

Tabela 3. Valores adimensionais de d^* , z^* e V^* a partir dos valores experimentais obtidos com vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹.

Valores Experimentais				Valores Adimensionais		
q (L/h)	d (m)	z (m)	V (L)	d^*	z^*	V^*
2	0,10	0,10	1	0,96	0,96	0,90
2	0,13	0,13	2	1,25	1,25	1,79
2	0,16	0,16	3	1,54	1,54	2,69
2	0,21	0,21	4	2,03	2,03	3,59
2	0,22	0,27	5	2,17	2,60	4,48
2	0,24	0,29	6	2,31	2,80	5,38
2	0,26	0,32	7	2,51	3,09	6,28
2	0,28	0,34	8	2,75	3,28	7,17
2	0,32	0,36	9	3,09	3,47	8,07
2	0,33	0,37	10	3,18	3,57	8,97
4	0,10	0,10	1	0,68	0,68	0,32
4	0,18	0,14	2	1,23	0,95	0,63
4	0,20	0,15	3	1,36	1,02	0,95
4	0,26	0,16	4	1,77	1,09	1,27
4	0,28	0,18	5	1,91	1,23	1,59
4	0,30	0,20	6	2,05	1,36	1,90
4	0,30	0,21	7	2,06	1,43	2,22
4	0,31	0,22	8	2,11	1,53	2,54
4	0,34	0,23	9	2,32	1,60	2,85
4	0,34	0,26	10	2,32	1,77	3,17
8	0,09	0,09	1	0,43	0,43	0,11
8	0,11	0,10	2	0,53	0,51	0,22
8	0,15	0,13	3	0,72	0,63	0,34
8	0,21	0,18	4	1,01	0,89	0,45
8	0,22	0,25	5	1,08	1,23	0,56
8	0,22	0,27	6	1,08	1,30	0,67
8	0,23	0,29	7	1,11	1,40	0,78
8	0,24	0,29	8	1,16	1,42	0,90
8	0,26	0,31	9	1,25	1,49	1,01
8	0,31	0,32	10	1,49	1,54	1,12

Utilizando-se os valores adimensionais da Tabela 3, foram realizadas análises de regressões entre os valores d^* versus V^* (Figura 28) e z^* versus V^* (Figura 29). Dentre os diferentes modelos analisados, verificou-se que o modelo de regressão exponencial foi o que melhor ajustou os dados observados, fazendo-o com alta precisão, como pode ser verificado pelos respectivos coeficientes de determinação ($R^2=0,92$; $R^2=0,90$).

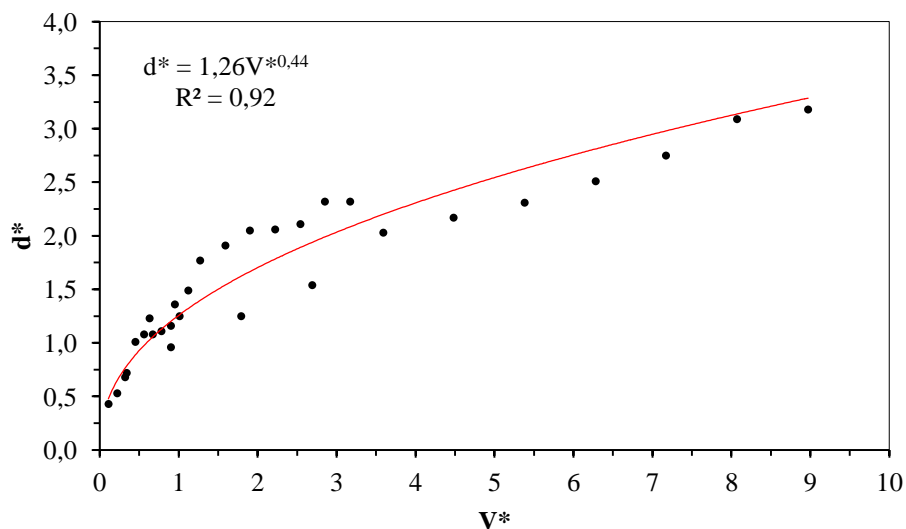


Figura 28. Correlação entre d^* e V^* , e a obtenção das equações exponenciais de correlação.

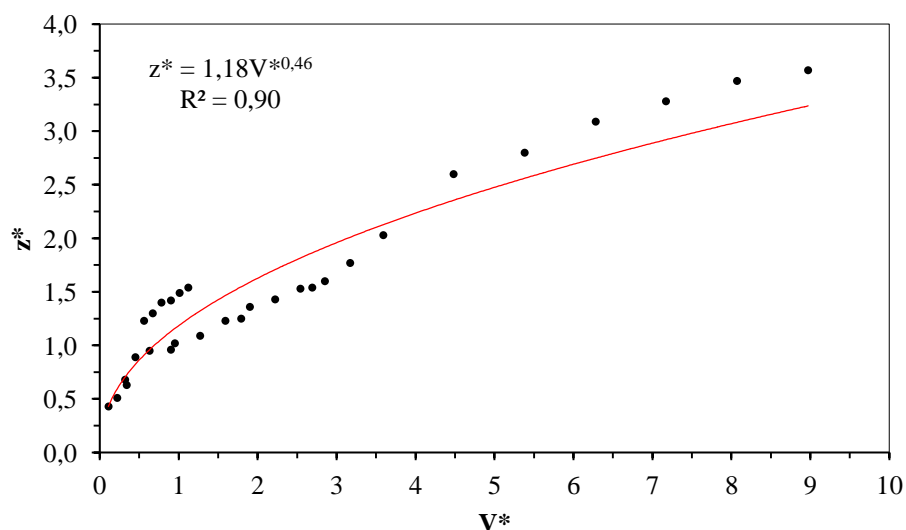


Figura 29. Correlação entre z^* e V^* , e a obtenção das equações exponenciais de correlação.

A partir das equações das regressões apresentadas nas Figuras 28 e 29 foram obtidas as constantes empíricas A_1 , A_2 , n_1 e n_2 apresentadas a seguir.

$$A_1 = 1,26 ;$$

$$A_2 = 1,18;$$

$$n_1 = 0,44;$$

$$n_2 = 0,46.$$

As constantes empíricas anteriores foram, então, substituídas nas equações (6) e (7), obtendo-se as seguintes equações:

$$d = 1,26 \times V^{0,44} \times \left(\frac{Ks}{q}\right)^{\frac{3}{2} \times 0,44 - \frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$z = 1,18 \times V^{0,46} \times \left(\frac{Ks}{q}\right)^{\frac{3}{2} \times 0,46 - \frac{1}{2}} \quad (18)$$

as quais, após a devida manipulação algébrica deram como resultado as equações a seguir:

$$d = 1,26 \times V^{0,44} \times \left(\frac{Ks}{q}\right)^{0,16} \quad (19)$$

$$z = 1,18 \times V^{0,46} \times \left(\frac{Ks}{q}\right)^{0,19} \quad (20)$$

4.4. Comparações entre os valores observados e simulados pelos modelos.

Na Tabela 4 estão apresentados os valores medidos para a diâmetro do bulbo molhado (d), profundidade (z), bem como seus valores estimados pelos modelos Schwartzman & Zur Reproduzido e Hydrus-2D, para os bulbos molhados gerados pelas vazões de 2, 4 e 8 l.h⁻¹.

Tabela 4. Valores observados e estimados pelos modelos HYDRUS-2D e Schwartzman-Zur.

q	V	d	z	dH	zH	dSZR	zSZR
(L h ⁻¹)	(L)			(m)			
2	1	0,10	0,10	0,17	0,15	0,12	0,12
2	2	0,13	0,13	0,20	0,20	0,17	0,16
2	3	0,16	0,16	0,23	0,23	0,20	0,19
2	4	0,21	0,21	0,25	0,26	0,23	0,22
2	5	0,23	0,27	0,27	0,28	0,25	0,25
2	6	0,24	0,29	0,28	0,30	0,27	0,27
2	7	0,26	0,32	0,30	0,33	0,29	0,29
2	8	0,29	0,34	0,31	0,34	0,31	0,30
2	9	0,32	0,36	0,32	0,36	0,33	0,32
2	10	0,33	0,37	0,33	0,38	0,34	0,34
4	1	0,10	0,10	0,17	0,14	0,11	0,10
4	2	0,18	0,14	0,20	0,18	0,15	0,14
4	3	0,20	0,15	0,22	0,21	0,18	0,17
4	4	0,26	0,16	0,25	0,24	0,21	0,19
4	5	0,28	0,18	0,26	0,27	0,23	0,22
4	6	0,30	0,20	0,28	0,29	0,25	0,23
4	7	0,30	0,21	0,29	0,31	0,26	0,25
4	8	0,31	0,23	0,30	0,33	0,28	0,27
4	9	0,34	0,24	0,31	0,34	0,29	0,28
4	10	0,34	0,26	0,32	0,35	0,31	0,30
8	1	0,09	0,09	0,16	0,13	0,10	0,09
8	2	0,11	0,11	0,20	0,18	0,14	0,12
8	3	0,15	0,13	0,22	0,21	0,16	0,15
8	4	0,21	0,19	0,24	0,24	0,18	0,17
8	5	0,23	0,26	0,25	0,26	0,20	0,19
8	6	0,23	0,27	0,27	0,28	0,22	0,21
8	7	0,23	0,29	0,28	0,30	0,24	0,22
8	8	0,24	0,30	0,30	0,32	0,25	0,23
8	9	0,26	0,31	0,31	0,33	0,26	0,25
8	10	0,31	0,32	0,32	0,35	0,28	0,26

dH=diâmetro do bulbo molhado estimada pelo modelo Hydrus-2D; zH=profundidade estimada pelo modelo Hydrus-2D; dSZR=diâmetro do bulbo molhado estimada pelo modelo Schwartzman-Zur reproduzido; zSZR=profundidade estimada pelo modelo Schwartzman-Zur reproduzido.

Utilizando-se os valores apresentados na Tabela 4, foram realizadas análises de regressão entre os valores medidos e estimados do diâmetro molhado (d) e da profundidade (z) dos bulbos molhados gerados pelas vazões de 2, 4 e 8 $\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$. Dentre os modelos estatísticos estudados, o modelo de regressão linear foi aquele que forneceu o melhor ajustamento entre eles. Na Figura 30 está apresentada a comparação entre z_{SZ} versus z ; na Figura 31 entre d_{SZ} versus d (Figura 31), na Figura 32 entre z_H versus h e na Figura 33 entre d_H versus d . É importante destacar (Figura 33) para o modelo HYDRUS-2D.

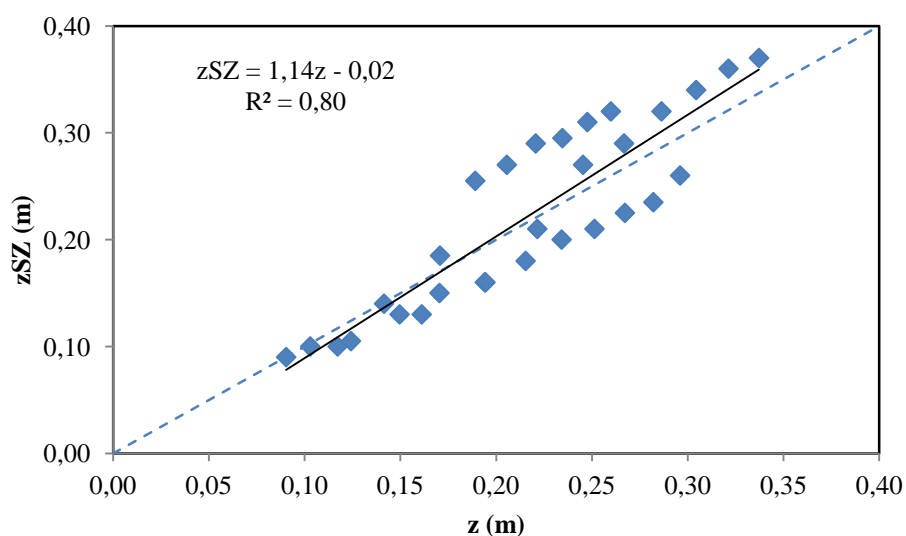


Figura 30. Profundidades estimadas pelo modelo Schwartzman & Zur reproduzido versus valores observados.

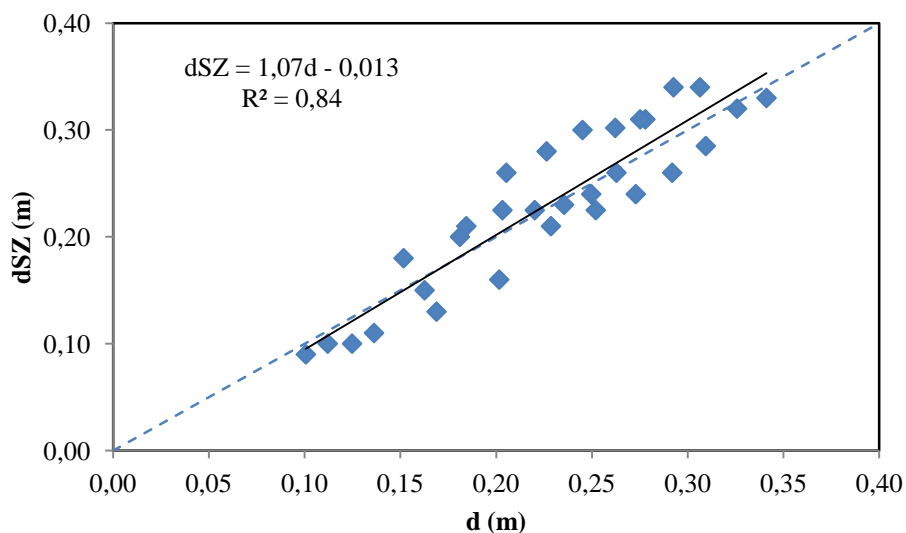


Figura 31. Diâmetros estimados pelo modelo Schwartzman & Zur Reproduzido versus valores observados.

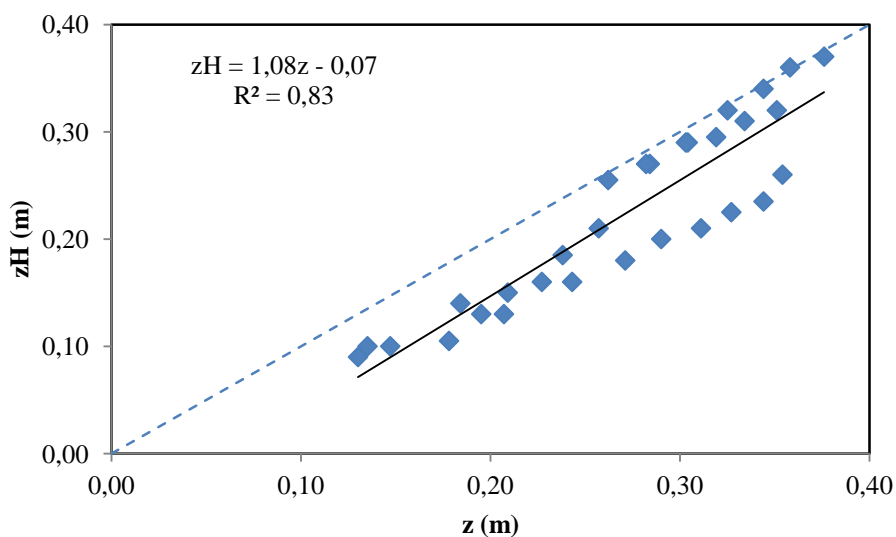


Figura 32. Profundidades estimadas pelo modelo HYDRUS-2D versus valores observados.

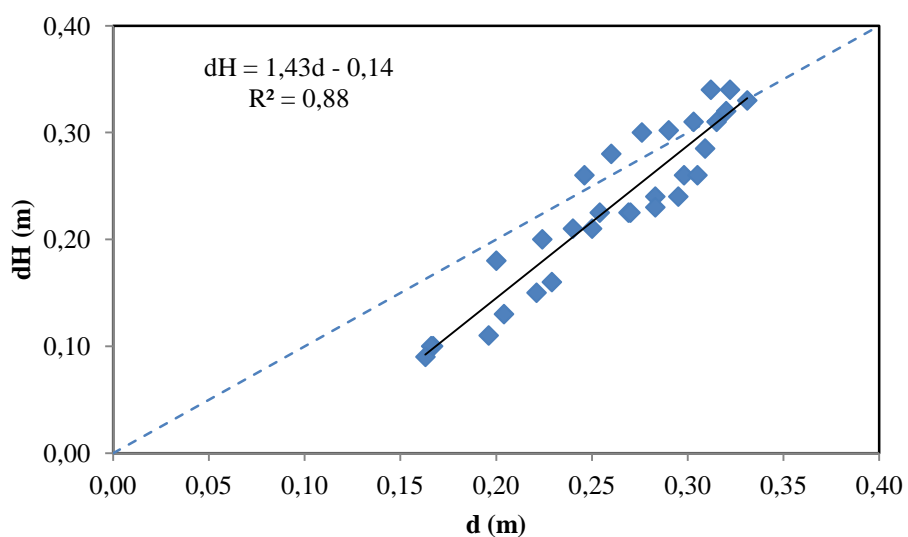


Figura 33. Diâmetros estimados pelo modelo HYDRUS-2D versus valores observados.

Na Tabela 5 estão apresentados os indicadores estatísticos relacionados com as equações de regressão linear simples entre as dimensões observadas do bulbo molhado observadas no experimento e as mesmas dimensões estimadas pelos modelos matemáticos Schwartzman & Zur Reprodzido e HYDRUS-2D (Figuras 31, 32 e 33).

Tabela 5. Indicadores estatísticos utilizados na análise de desempenho dos modelos matemáticos Schwartzman-Zur Reproduzido e HYDRUS-2D.

	n	a	b	SEE	R ²	d
dH	30	0,14	1,43	0,05	0,88	0,85
dSZR	30	0,01	1,07	0,03	0,84	0,95
zH	30	0,07	1,08	0,06	0,83	0,85
zSZR	30	0,02	1,14	0,04	0,80	0,94

Número de observações (n); coeficiente linear da reta (a); coeficiente angular da reta (b); somatória dos erros estimados (SEE); coeficiente de determinação (R²) e índice de ajuste de Willmott (d).

Pode ser observado pelos indicadores estatísticos apresentados na Tabela 5, que tanto o modelo Schwartzman-Zur Reproduzido quanto o HYDRUS-2D estimaram os dimensões d e z dos bulbos molhados com exatidão e precisão altas, como pode ser constatado pelos respectivos coeficientes angulares e de determinação.

Particularizando-se esta análise, pode ser verificado que o modelo Schwartzman-Zur Reproduzido estimou o diâmetro (d) do bulbo molhado com erro de 7%, enquanto que o erro cometido pelo HYDRUS-2D foi de 43%. Estes números indicam claramente que o primeiro modelo teve desempenho superior aquele do segundo nas estimativas do parâmetro estudado (d), conclusão esta que é corroborada pelos respectivos índices de ajuste de Willmott, os quais foram, na mesma ordem anterior, de 95 e 85%. Quanto aos demais indicadores (SEE e R²) pode ser verificado que eles tiveram praticamente a mesma ordem de precisão para os dois modelos.

No caso da profundidade (z) do bulbo molhado, entretanto, pode ser verificado que o melhor desempenho ficou com o modelo HYDRUS-2D, o qual estimou o parâmetro em análise (z) com erro de 8%, contra 14% do modelo Schwartzman-Zur Reproduzido. Esta conclusão, entretanto, agora não é corroborada pelos respectivos índices de ajuste de Willmott, os quais foram, na mesma ordem anterior, de 85 e 94%. Quanto aos demais indicadores (SEE e R²) pode ser verificado que eles tiveram praticamente a mesma ordem de precisão para os dois modelos, como já ocorrera anteriormente.

Embora que o modelo Schwartzman-Zur Reproduzido seja empírico, este apresentou indicadores estatísticos melhores para a estimativa da distância e da

profundidade do bulbo molhado, quando comparado com as estimativas realizadas pelo modelo HYDRUS-2D. Estes resultados se devem ao fato que o modelo Schwartzman-Zur Reproduzido utiliza como base, as dimensões do bulbo molhado observadas nas condições de campo, enquanto o modelo HYDRUS-2D necessita de informações geométricas, temporais e físico-hídricas do solo, além de demandar medidas dos diâmetros da poça saturada e da frente de molhamento durante o processo de infiltração de água no solo.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que os modelos Schwarzman-Zur Reproduzido e HYDRUS-2D podem ser utilizados para estimar as dimensões do bulbo molhado para gotejadores com vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹. Entretanto para as condições estudadas nesta pesquisa, recomenda-se a utilização do modelo Schwarzman-Zur Reproduzido por ter apresentado melhores indicadores estatísticos e também apresentar maior facilidade de operação e ser de baixo custo.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p.650-662, 1989.

ALMEIDA, B.P.; CAVALCA, M.; SOUZA, C.F. Calibração da técnica de TDR para estimativa da umidade do solo. In: XII MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2007, Taubaté. **Anais**. Universidade de Taubaté, ENIC, 2007.

BAKER, J. M.; ALLMARAS, R. R. System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 1-6, 1990.

BARROS, A.C. et al. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Irriga**, Botucatu, v.15, n. 4, p. 361-372, 2010.

BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, New York, v.1, p.3-17, 1978.

BRESLER, E. et al. Infiltration of trickle source: Experimental data and theoretical predictions. **Science Society of America Proceedings**, v.35, p.683-689, 1971.

CARVALHO, L.A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. Piracicaba: ESALQ – USP, Dissertação Mestrado, 86 p, 2002.

COELHO, E.F.; OR, D. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.206, p.123-136, 1999.

CHRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos dos cerrados e seu potencial de utilização na irrigação. **ITEM**, Brasília, n. 69/70, p. 87-97, 2006.

DASBERG, S.; OR, D. **Drip Irrigation**. Berlin: Springer, 162p, 1999.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic detection of soil moisture. Progress Report, 1. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v.3, n.1, p.76-86, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **Journal of Physics Chemicals**, Columbus, v.73, p.616-623, 1969.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

GENUCHTEN; M. T. van; SIMUNEK, J. Integrated modeling of vadose zone flow and transport processes. **In: FEDDES, R.A.; ROOIJ, G.H.; DAM, J.C. van. Unsaturated zone modeling: Progress, challenges na applications.** Dordrecht: Kluwer Academic, 2004, Cap. 2, p. 37-69.

HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P.; MURPHY, F. Automatic, real time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. **Water Resources Research**, Washington, v. 27, p. 857-864, 1991.

HERRMANN, P.S.P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas.** 1993. 132p. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

KARMEI, D.; KELLER, J. **Trickle irrigation design.** Glendora, California: Rain Bird Sprinkling Manufacturing Corporation, 1975. 132p.

KELLER, J.; BLIESNER, R. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Chapman and Hall, 1990. 652p.

LOPES, L.N. et al. Caracterização da distribuição da água no solo para irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 4, p. 564-577, 2009

LOPES, L.N.; SOUZA, C.F.; SANTORO, B.L. Utilização da TDR para monitoramento da solução de nitrato de potássio em latossolo vermelho-amarelo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n.5, p.932-947, 2010.

LÓPEZ, J. R., et al. **Riego Localizado.** Madrid, España: Mundi - Prensa, 1992. 405p.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.31, p.213-237, 2001.

OR, D. Stochastic analysis of water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p.1222-1233, 1996.

PAULINO, J. et al. Situação da agricultura irrigada no Brasil de acordo com o censo agropecuário 2006. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 163-176, 2011.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): Goteo, Microaspersión, Exudación.** Madrid: Ediciones Mundi – Prensa, 461 p, 1987.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1990, 188p.

SALLES, E. S. **Efeito da vazão e do volume de água aplicada por um emissor puntual nas dimensões do bulbo molhado em um latossolo vermelho-escuro álico.** (Mestrado – Universidade Federal de Viçosa – UFV). Viçosa, 66 p, 1990.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, p.242-253, 1986.

SELKER, J. R.; GRAFF, L.; STEENHUIS, T. Noninvasive time domain reflectometry moisture measurement probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 934 – 936, 1993.

SIMUNEK, J.; VOGEL, T.; VAN GENUCHTEN, M. **SWMS 2D: simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media.** Riverside, California: US Salinity Lab, p.151, 1993.

SKAGGS, T. H. et al. Comparison of Hydrus-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 130, n.4, p. 304-310, 2004

SOLOMON, K.; KELLER, J. Trickle irrigation uniformity and efficiency. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.104, p.293-306, 1978.

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**, v.8, n.1, p.7-15, 2004.

SOUZA, C.F. et al. Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p.12-25, 2006.

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V.; OR, D. Distributioin and storage characterization of soil solution for drip irrigation. **Irrigation Science**, New York, v.27, n.4, p.277-288, 2009.

TAGHAVI, S. A.; MARINO, M. A.; ROLSTON, D. E. Infiltration from trickle irrigation source. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.110, p.331-341, 1984.

TOMMASELLI, J. T. G. ; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1145-1154, 2001.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. Measurement of soil water content using time domain reflectometry (TDR): a field evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 19-24, 1985.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p.184-194, 1981.

WOODING, R.A. Steady infiltration from a circular pond. **Water Resources Research**, Washington, v.4, p.1259-1273, 1968.

ZEGELIN, S. J.; WHITE, I.; JENKINS, D. R. Improved fields probes for soil water content and electrical conductivity measurements using TDR. **Water Resources Research**, Washington, v. 25, n. 11, p. 2367-2376, 1989.