Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Estudo da distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento
enterrado e superficial**

Allan Cunha Barros

**Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestre em Agronomia. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2007**

Allan Cunha Barros
Engenheiro Agrônomo

Estudo da distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial

Orientador:
Prof. Dr. MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Barros, Allan Cunha

Estudo da distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial / Allan Cunha Barros. - - Piracicaba, 2007.
61 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Distribuição de água 2. Gotejador 3. Irrigação – Manejo 4. Nitossolo 5. Solutos
I. Título

CDD 631.7

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

A melhor de todas as mães (a minha): Dona Lourdinha, ao meu pai Erinaldo e ao meu irmão Eder, e a minha noiva e incentivadora científica, Michelle.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha existência, por me ensinar que na vida sempre haverá um caminho difícil, mas que para transcorrê-lo é só confiar Nele.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade de aperfeiçoar e adquirir novos conhecimentos;

Ao professor Dr. Marcos Vinicius Folegatti, pela orientação e pela oportunidade de trabalhar ao seu lado;

Em especial, ao professor Dr. Claudinei Fonseca Souza, pela co-orientação, amizade, confiança, paciência e também por passar o conhecimento sobre a técnica base da dissertação, fazendo com que fosse possível a realização deste trabalho;

Ao professor Dr. Antenor de Oliveira Aguiar Netto, pela orientação, amizade, confiança, apoio e por me ajudar a trilhar os primeiros passos na carreira acadêmica, além de servir como exemplo de profissional;

Ao professor Dr. Luis Fernando de Souza Magno Campeche, pela orientação, amizade, confiança e por passar uma tarde inteira comigo falando sobre os benefícios de se estudar na ESALQ, além de me indicar ao Prof. Folegatti.

Ao amigo de produção científica e ex-companheiro de moradia Pedro Róbinson Fernades de Medeiros;

Ao coordenador do curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, professor Dr. José Antônio Frizzzone, pelas condições oferecidas para a realização deste trabalho;

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem pelos ensinamentos transmitidos;

Aos funcionários do departamento do Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem pela ajuda nos momentos difíceis;

Aos alunos e professores do curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Taubaté: Léo, Bruno, Antônio Cláudio, Letícia, Lucas, Claudinei e outros, pela ajuda na construção e instalação das sondas e no treinamento sobre a técnica da TDR.

As secretárias, Beatriz Regina Novaes, Davilmar Aparecida Domingues Collevatti, Sandra Regina T. Silveira Mello e Vanda Macedo Zambello, pela dedicação e constantes apoios;

Aos companheiros do curso de pós-graduação, Antonio, Adalberto, Ariovaldo, Fábio Jordão, Elenilson “pipira”, Alexsandro Almeida, Anthony “Garotinho”, Valfísio, Ronaldo, Marcos Schaaf, Marco Rosa, Ceres, Lucas “moranguinho”, Cláudio “japa”, Jokastah “Joka”, Juan, César, Pelé, Tales “miseravão”, Waleska, Kelly “pimpona”, Rochane “Rok-Se”, Maria Eduarda “Duda”, Fabiana, Pedro, Wanderlei, Jorge “timbalada”, Lucas, Alisson, Sergio “Poderoso” Weyne, Sérgio Tapparó, Pabblo “Pimpão”, Rodrigo, Priscylla, Ceres, Cícero, Cleomar, Gabriel, Thiago, Robson “Açu”, Robson “tico-tico”, Mingote, Osvaldo “Avon”, João Batista, João Lelis, pela amizade e momentos de descontração;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo;

À todos que colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Irrigação por gotejamento subsuperficial.....	14
2.3. Forma e dimensões do bulbo molhado	15
2.4 Dinâmica do soluto no bulbo molhado	18
2.5 Movimento do Nitrato no solo.....	19
2.6 Monitoramento da Salinidade no Solo.....	21
2.7 TDR.....	23
2.8 Calibração	24
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1 Construção, Calibração e Instalação das sondas	26
3.2 Umidade e condutividade elétrica	28
3.3 Sistema de Irrigação.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Disco Saturado e Área Superficial Molhada	32
4.2 Distribuição da água no solo	35
4.3 Distribuição da Uniformidade e da Condutividade Elétrica no volume de controle.....	43
4.4 Análise dos dados de CE_{TDR} em função do extrato de saturação e concentração de Nitrato.....	45
4.5 Distribuição da CE no solo	47
5 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS.....	55

RESUMO

Estudo da distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial

Em função do número reduzido de estudos sobre o movimento da água e de íons no bulbo molhado, foi realizado este trabalho com o objetivo de avaliar a distribuição de água e concentração de nutrientes no bulbo formado pelo sistema de gotejamento enterrado em comparação ao superficial. O ensaio foi conduzido na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, localizada no município de Piracicaba, SP. Para a avaliação foram abertas trincheiras e instaladas sondas de TDR, para o monitoramento da distribuição da solução, dispostas a 0,5; 0,15; 0,25; 0,35 e 0,45 m – profundidade, e a 0,5; 0,15; 0,25; 0,35 m – comprimento, totalizando 17 sondas em malha por trincheira. A solução de KNO_3 foi aplicada a partir de gotejadores com diferentes vazões (2 e 4 L/h), sendo aplicado o volume de 1 L em intervalos de 1 hora, totalizando 10 L de solução por repetição. Conjuntamente ao monitoramento da distribuição da solução no solo, medições da área superficial molhada e do disco saturado foram feitas com régua milimetrada, além disso, foi estabelecido um volume de controle onde foram avaliadas a uniformidade de aplicação de água e KNO_3 . Desta forma, foi possível verificar que: em relação aos sistemas superficiais, os sistemas enterrados apresentaram menor área superficial molhada e atingiram uma maior largura e profundidade; a umidade inicial do solo influencia a formação do bulbo molhado e o movimento do KNO_3 no solo; a uniformidade de sais distribuídos no volume de controle é afetada negativamente pelo aumento do volume aplicado e as maiores concentrações de água e concentração de KNO_3 foram obtidas próximas ao ponto de emissão.

Palavras-chave: Reflectometria no domínio do tempo (TDR); Gotejamento subsuperficial; Dinâmica de água e íons; Volume molhado; Nitossolo Roxo

ABSTRACT

Soil solution distribution study applied by subsurface and surface drip irrigation

In function of the reduced number of studies on the water and ions movement in the wet soil volume, this work was conducted with the goal of evaluating the distribution of water and nutrient concentration in the wetted soil volume formed by subsurface drip irrigation (SDI) in comparison to surface system. The rehearsal was conducted in the experimental area of the Rural Engineering Department - ESALQ/USP, located in Piracicaba, SP. Trenches were opened and installed probes of TDR for studying to solution distribution, to facilitate the study a mesh of probes was disposed to 0,5; 0,15; 0,25; 0,35 and 0,45 m - depth, and to 0,5; 0,15; 0,25; 0,35 m - length, with the total of 17 probes. The solution of KNO_3 was applied starting from emitters with different flows (2 and 4 L/h), it was applied the volume of 1 L within intervals of 1 hour, with the total of 10 L of solution for repetition. All together to study the solution distribution in the soil, the wet superficial area measurements and of the saturated disc they were done by the ruler, besides, it was established a control volume where the uniformity application of water and KNO_3 was analysed. This way, it was possible to verify that: in relation to the superface systems, the SDI presented smaller wet superficial area and they reached a larger width and depth; the initial soil water content influences the formation of the wetted soil volume and the KNO_3 movement in the soil; the salt uniformity, distributed in the control volume, is affected negatively by the applied volume increased, and the largest concentrations of water and KNO_3 were obtained close to the emission point.

Keywords: Time domain reflectometry (TDR); Subsurface drip irrigation; Dynamic of water and ions; Wetted volume; Purple Nitosol

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhe constituinte das sondas de TDR	27
Figura 2 - Gabarito para confecção das sondas de TDR	27
Figura 3 - Disposição das sondas no perfil do solo	28
Figura 4 - Trado utilizado para instalação do sistema de gotejamento enterrado (esquerda) e distribuidor de descarga com microtubo.	30
Figura 5 - Área superficial molhada para as Vazões de 2 e 4 L/h, no sistemas de gotejamento superficial e enterrado	33
Figura 6 - Disco Saturado para as Vazões de 2 e 4 L/h, nos sistemas de gotejamento superficial e enterrado	33
Figura 7 - Formação desigual da superfície molhada e sentido das leituras do bulbo	34
Figura 8 - Comparação entre os perfis de umidade (m^3/m^3) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 2 L/h no sistema enterrado	38
Figura 9 - Comparação entre os perfis de umidade ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 4 L/h no sistema enterrado	39
Figura 10 - Comparação entre os perfis de umidade ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 2 L/h no sistema superficial	40
Figura 11 - Comparação entre os perfis de umidade ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 4 L/h no sistema superficial	41
Figura 12 - Comparação entre os perfis de umidade ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L)	42
Figura 13 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para a umidade em função da vazão e do sistema para uma determinada região de controle	44

Figura 14 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para a condutividade elétrica em função da vazão e do sistema para uma determinada região de controle	45
Figura 15 - Gráficos de dispersão entre os dados obtidos com o TDR (CE – dS/m), Extrato de saturação(CE – dS/m) e o Cardy-Horiba (nitrato – mg/L)	46
Figura 16 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m ⁻³) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 2 L/h no sistema enterrado.....	50
Figura 17 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m ⁻³) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 4 L/h no sistema enterrado.....	51
Figura 18 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m ⁻³) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 2 L/h no sistema superficial.....	52
Figura 19 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m ⁻³) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L). Vazão de 4 L/h no sistema superficial.1L). Vazão de 4 L/h no sistema superficial	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise granulométrica do solo, para as profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4m	26
Tabela 2 - Análises de variância das regressões das equações de calibração a partir dos dados do TDR	46

1 INTRODUÇÃO

A irrigação por gotejamento, quando bem manejada, permite uma maior eficiência de aplicação de água e nutrientes (fertirrigação). Este sistema pode ser utilizado de duas formas: na superfície ou enterrado, também chamado de sistema de irrigação subsuperficial.

Devido ao elevado custo das áreas produtivas de cana em São Paulo, a adoção de técnicas como o gotejamento enterrado é alternativa técnica para aumentar os índices de produtividade. Este sistema também é utilizado em outras culturas como tomate (MAROUELLI; SILVA, 2002), melão (MONTEIRO, 2007), mamão (SOUZA et al. 2003), alface (GOMES; SOUSA, 2002), citros e café (FARIA, 2002).

O sistema de gotejamento enterrado apresenta como vantagens em relação ao superficial a flexibilidade do uso de maquinário agrícola; maior dificuldade na germinação de sementes de ervas daninhas, uma vez que o solo se mantém seco na superfície e possibilidade do uso com água salina sem redução da produção. (ORON et al., 1999).

Além disso, o sistema enterrado apresenta uma maior disponibilidade de nutrientes, uma vez que o ponto de emissão se encontra mais próximo da raiz, fato importante no manejo da fertirrigação. Apesar disso, informações sobre o movimento simultâneo da água e dos sólidos dissolvidos são escassos (CLOTHIER; SAUER, 1988).

O bulbo ou volume úmido do solo é a distribuição de água no volume molhado por gotejamento, sendo uma ferramenta indispensável na determinação de quanto e quando irrigar. O bulbo pode ser medido diretamente em campo, através da abertura de trincheiras ou através de medidas indiretas como tabelas ou modelos. Devido a especificas do solo, o uso de tabelas ajustadas para todos os mesmos nem sempre são adequadas para os solos do Brasil, sendo necessários estudos que os caracterizem.

O bulbo tem relação direta na distribuição de nutrientes para a planta. Segundo LI, Zhang e Ren. (2003), o nitrato (NO_3^-) é acumulado no limite do bulbo, não importando a taxa de aplicação, nem o volume aplicado. Assim, o conhecimento das dimensões do bulbo são importantes também no manejo da fertirrigação, já que se o

diâmetro do bulbo ultrapassar a região radicular, este não disponibilizará todo o nutriente aplicado à planta.

O dimensionamento do bulbo, bem como a distribuição de íons no solo, podem ser determinados através da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). As vantagens inerentes da técnica da TDR como a precisão, método não destrutivo, a não utilização de radiação ionizante, possibilidade de automação e acoplamento a dispositivos multiplicadores de leituras, pouca influência da textura, densidade e salinidade são justificativas fortes para a adoção cada vez maior da técnica, em substituição de outros métodos (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980; COELHO; OR, 1996).

Altas tecnologias, como o sistema por gotejamento enterrado, só se tornam viáveis se forem utilizadas técnicas adequadas de manejo de irrigação que visem à racionalização do uso da água e aumento da produtividade (COELHO; OR; SOUZA, 1999), tornando-se necessário o estudo do movimento de água e soluto quando aplicado em profundidade. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a distribuição de água e soluto no bulbo formado pelo sistema de gotejamento enterrado em comparação ao superficial.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação por gotejamento subsuperficial

A irrigação por gotejamento pode ser classificada, segundo a posição de instalação da linha de emissores, em superficial e subsuperficial: Superficial é a forma mais comumente encontrada, ou seja, quando os emissores se encontram na superfície do solo; e a Subsuperficial é quando os emissores se localizam abaixo da superfície, então podemos definir sistema de irrigação subsuperficial - SDI (Subsurface drip irrigation) como a aplicação de água abaixo da superfície de terra (> 2 cm) por emissores com vazões iguais aos usados em irrigação por gotejamento (CAMP, 1998).

O desenvolvimento da irrigação por gotejamento subsuperficial teve início com irrigação por gotejamento nos EUA, aproximadamente em 1959, especialmente na Califórnia (DAVIS; JUNIOR; DAVIS, 1967) e Hawai (VAZIRI; GIBSON, 1972). Em 1970, ensaios com cana-de-açúcar foram realizados usando tipo de emissores nas linhas laterais. Na mesma época, em Israel, estavam sendo desenvolvidos sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial, juntamente com sistemas de injeção de fertilizantes (GOLDBERG; SHMUELI, 1970).

Nos últimos 15 anos, o Sistema de SDI foi comercialmente e experimentalmente usado em inúmeras culturas, principalmente algodão e milho (COELHO; OR 1999; PHENE et al., 1991), provavelmente por causa de sua importância econômica. No Brasil, tal sistema vem sendo aplicado para culturas de alto retorno econômico, como fruteiras e hortaliças; entretanto, não há literatura sobre avaliação das produtividades de culturas nessas condições. (COELHO; OR; SOUZA, 1999).

As principais vantagens desse sistema são: reduzida geração de escoamento superficial; flexibilidade do uso de maquinário agrícola; maior dificuldade na germinação de sementes de ervas daninhas, uma vez que o solo se mantém seco na superfície; maior disponibilidade de nutrientes, uma vez que o ponto de emissão se encontra mais próximo da raiz e menor redução da produção quando do uso de água salina (ORON; DEMALACH; GILLERMAN 1991; ORON et al., 1999).

Além disso, o fato do suprimento de água se dar diretamente na zona radicular torna esse sistema bastante eficiente na minimização de perdas evaporativas, além de reduzir tanto o risco de lixiviação do íon nitrato como o de transmissão de doenças causadas por bactérias e fungos, possibilitando o uso de águas de reuso (SUAREZ-REY; CHOI; WALKER, 1999; PHENE; RUSKIN, 1995). Redução do potencial de contágio humano e menor probabilidade de aparecimento de doenças vegetais.

Segundo Oron, Demalach e Gillerman (1991), como desvantagens do sistema estão: possíveis problemas de germinação de sementes da cultura principal; dificuldade na detecção de problemas de entupimento de emissores; nas instalações enterradas a pequenas profundidades, pode haver dificuldade no cultivo do solo, resultando em dano mecânico, principalmente quando as linhas de gotejadores são posicionadas fora da linha de plantio (AYARS et al., 1995); dano mecânico causado por roedores (SORENSEN; WRIGHT; BUTTS, 2001; AYARS; PHENE; HUTMACHER, 1999).

As profundidades das linhas laterais variam de 0,02 m a 0,70 m dependendo do solo e da cultura. Em casos em que a cultura não é considerada (por exemplo: grama, alfafa), profundidades às vezes variam de 0,10 m a 0,40 m. A germinação das sementes, o estabelecimento, o crescimento de mudas e a existência de camadas de solo que interferem o movimento ascendente da água, também são outros fatores que afetam a profundidade lateral. (PHENE; SANDERS, 1976).

2.3. Forma e dimensões do bulbo molhado

Durante o processo de infiltração, se o solo estiver relativamente seco, existe uma diferença visível entre o solo molhado pela lâmina de água que avança e o solo seco. Este plano é denominado frente de molhamento. No caso da infiltração de água em solos relativamente úmidos, a frente de molhamento é difusa e difícil de ser determinada (REICHARDT, 1990).

A propagação da frente de molhamento, proveniente de uma fonte pontual de água no solo, é tridimensional e a forma do volume de solo umedecido depende, principalmente, do equilíbrio entre as forças capilares e gravitacionais.

Um dos fatores importantes para ser considerado no cálculo de um projeto de irrigação por gotejamento é a proporção da superfície ou volume de solo molhado que deve ser umedecida com respeito à superfície total ou volume de solo que pode estar ocupado pelas raízes.

Estudos realizados por Phene (1990) demonstram que um pulso de sistema de irrigação por gotejamento enterrado pode ter 46% de volume e 62% da área de interface de umedecimento maior, do que um pulso de sistema de irrigação por gotejamento superficial, para a mesma amostra equivalente de água.

Geralmente, o critério para dimensionar um sistema por gotejamento é baseado na Classe textural do solo. No entanto, Thorburn, Cook e Bristow (2003) deixa claro, através de um exemplo ocorrido na Austrália, onde a recomendação não se enquadrava com a realidade em campo, que não se pode confiar no uso de critérios do tipo de textura do solo para determinação do volume de solo molhado para sistemas de irrigação por gotejamento.

Há muitas soluções analíticas para equações descrevendo a infiltração de água de fontes pontuais que permitem a estimação de padrões de umedecimento do solo a partir das propriedades hidráulicas do solo (CAMP, 1998). Padrões de umedecimento são, normalmente, caracterizados pelo eixo radial (r) e vertical (z^+ , z^-) que são as distâncias da frente de molhamento do emissor. Quando suas propriedades hidráulicas são conhecidas, estes modelos podem fornecer um sistema geral para fornecer valores de r e z (REVOL et al., 1997 apud THORBURN; COOK; BRISTOW, 2003).

Segundo Nascimento e Soares (1988), na irrigação por gotejamento, recomenda-se que o volume de solo molhado seja obtida com base em bulbos molhados produzidos por gotejadores, em condições de campo. Geralmente, testes de campo não são realizados devido ao tempo necessário, trabalho árduo, recursos e cuidados experimentais envolvidos, principalmente por ser recomendada a abertura de trincheiras. Assim, a prática se adianta à investigação científica e com isso surgem os problemas. Infelizmente, este fato tem implicado em prejuízos de produtividade e desestímulo ao uso da técnica do gotejamento por parte de alguns agricultores.

Segundo Pizarro (1987), o valor de percentagem de área molhada de 30 a 40 % é o mais aceitável e recomendado. Com valores menores, corre-se o risco dos mesmos

serem insuficientes em relação ao consumo de água pela planta. Acima desta faixa de valores a situação é mais segura, porém o custo da irrigação é mais elevado onerando o projeto e reduzindo o retorno financeiro.

Segundo Lazarovich et al. (2007) a distribuição de água no solo é afetada por vários fatores, incluindo as características hidráulicas do solo, condição inicial, taxa de aplicação dos emissores, frequência de aplicação, características das raízes, evaporação e transpiração, porém a área mínima ideal para o dimensionamento do sistema não está ainda definida, sendo razoável, segundo Keller e Bliesner (1990), considerar-se uma percentagem inferior a 67% para regiões áridas e superior a 33% para regiões de irrigação suplementar.

Souza e Matsura (2004) observaram percentagens de área molhada que concordam com o recomendado quando utilizado gotejadores de 4 L/h e espaçamento de 0,50 m; entretanto, a área molhada sobreposta não ultrapassou 10%; Keller e Bliesner (1990) sugerem sobrepor em 20% os bulbos molhados para alcançar índices ideais de uniformidade de distribuição da água no solo. Paralelamente e dentro deste contexto, surge a importância de se poder alterar a área superficial molhada com a combinação de espaçamentos entre gotejadores. A menor área molhada reduz a perda de água por evaporação; obrigatoriamente, o fator econômico se impõe em contrapartida aos seus investimentos no projeto com o aumento de gotejadores e, sendo assim, essas evidências despertam a necessidade de se estudar diferentes combinações de vazões e espaçamento entre gotejadores.

Segundo estudos desenvolvidos por Ben-Asher e Phene (1993) apud Monteiro (2007), num solo de textura franco-argilosa, o volume do bulbo molhado do sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial (SDI) foi 46 % maior que o do bulbo molhado do sistema de irrigação por gotejamento superficial. Da mesma forma, a superfície molhada para o uso das raízes, que corresponde ao bulbo do sistema de SDI, foi 62 % maior que no sistema de irrigação por gotejamento superficial.

“Nogueira, Coelho e Leao (2000) fizeram comparações entre os bulbos molhados originados da ação de gotejadores localizados na superfície do solo e de gotejadores enterrados, num solo Argissolo Vermelho Amarelo, sob uma vazão de 2,6 L h⁻¹. Observaram que a disponibilidade de água (entre 29 e 44 %) foi maior no caso do

emissor enterrado. A esse respeito, Assouline (2002) indica que, o padrão de molhamento durante a aplicação de água, geralmente, consiste de duas regiões: (i) região saturada perto do emissor e (ii) região onde o conteúdo de água diminui em direção a frente de molhamento” (MONTEIRO, 2007).

Para um mesmo volume aplicado, o aumento da vazão implica um aumento do avanço horizontal e um decréscimo da profundidade do bulbo molhado. A medida que se aumenta o volume de água aplicado, maior é o avanço da frente de molhamento, tanto em profundidade quanto lateralmente, aumentando as dimensões do bulbo molhado (SOUZA; MATSURA, 2004).

A escolha adequada da vazão do gotejador e do volume de água aplicado tem grande utilidade em termos de projeto, dada a possibilidade de controlar o teor de água e a forma do volume de solo molhado, porém tem-se que conhecê-los a priori, por meio de ensaios de campo (KELLER, 1984).

2.4 Dinâmica do soluto no bulbo molhado

Além de determinar a forma do bulbo molhado, em cultivos com fertirrigação, é importante realizar o acompanhamento da dinâmica e distribuição dos nutrientes no perfil do solo. Esta prática permite estabelecer ou ajustar a aplicação adequada dos fertilizantes e o manejo da água de irrigação, além de poder prevenir danos ambientais, como a salinização dos solos e a contaminação do lençol subterrâneo e fontes de água superficiais. Dentro do bulbo molhado esse acompanhamento pode ser feito através de amostragens do solo e posterior determinação da condutividade elétrica e concentração de íons, que utiliza o extrato de saturação do solo ou por amostragens de solução do solo, pela utilização de extratores de solução do solo.

Sabe-se que em irrigação por gotejamento a distribuição da água concentra-se ao redor do gotejador, resultando em acúmulo de sais nas extremidades do bulbo molhado. Este fenômeno conduz, freqüentemente, a salinização dentro da área irrigada e usualmente são requeridas irrigações adicionais para percolar o excesso de sais, principalmente se a água de irrigação conter quantidades consideráveis de sais. Plantas tolerantes e resistentes à salinização adicionadas ao manejo adequado da fertirrigação

podem modificar este cenário (GARNIER; BERGER; RAMBAL, 1986; HAMZA; ALYMORE, 1992; GREEN; CLOTHIER, 1995).

O fornecimento de nutrientes para as plantas através da fertirrigação está em função da concentração dos nutrientes na água de irrigação, concentração da solução do solo, evapotranspiração e nutrientes absorvidos pelas plantas. Informações detalhadas sobre a absorção de nutrientes pelas plantas são fundamentais para a otimização da fertirrigação (HAGIN; LOWENGART, 1996).

O monitoramento da fertirrigação deve ser feito para avaliar o manejo em si, com base nos impactos causados no solo que possam influenciar o desenvolvimento das plantas, que deve envolver o acompanhamento da aplicação dos fertilizantes observando a concentração da solução injetada, concentração da solução final na saída dos emissores, uniformidade de distribuição ao longo da área e distribuição dos nutrientes no perfil do solo (SOUZA; COELHO, 2001).

Os nutrientes minerais se movem no volume úmido de uma forma consistente conforme o fluxo de água no solo, sua solubilidade e/ou reatividade com componentes na solução do solo, e com sua interação, se existir, com os locais de troca do solo. Posto que as características químicas dos fertilizantes diferem, os nutrientes minerais são distribuídos diferentemente no solo quando aplicados por irrigação por gotejamento (GOLDBERG et al., 1971; BAR-YOSEF, 1977; PAPADOPOULOS, 1985).

2.5 Movimento do Nitrato no solo

A maioria das plantas necessitam de N em quantidades relativamente grandes quando comparado a outros nutrientes (HOCHMUTH, 1994). O nitrogênio em forma de nitrato não reage com os locais de troca do solo e não é retido pelo solo. O nitrato, por ser um ânion, não é retido em solos cuja predominância de cargas seja negativa apresentando, por isso, grande potencial de lixiviação, o que pode causar sérios problemas de poluição às águas subterrâneas. A aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes nitrogenados tem sido freqüentemente sugerida como principal fonte de contaminação de águas subterrâneas (SPALDING et al., 1982).

Segundo Newbould (1989) o consumo de fertilizantes nitrogenados tem aumentado em escala global, sendo as estimativas de consumo de 111 – 134 milhões de toneladas a serem consumidas no ano 2000.

Os nitratos se movem com outros sais solúveis para frente de molhamento. Dando ênfase, Boswell et al. (1985) reporta que o nitrato é relativamente inerte, então, suscetível ao movimento através da difusão e do transporte de massa na água do solo. Isso é devido às combinações de nitrato serem prontamente solúveis em água e normalmente não são absorvidas pelas partículas de argila. O nitrato, altamente solúvel e não absorvido, será provavelmente perdido por deflúvio e/ou percolação. Perdas de N em forma de gases envolvem a desnitrificação e volatilização da amônia. A desnitrificação é o processo pelo qual são convertidos nitratos em gases de N por atividades microbianas no solo. Mas a percolação de N, provavelmente, é o modo dominante no qual o N é perdido no sistema solo-planta, principalmente se o solo conter quantidades significativas de nitrato. Assim torna-se importante manejar adequadamente o N evitando excesso e aplicando, de forma localizada, apenas o necessário.

Para prevenir e minimizar a poluição de água subterrânea com nitrato e aumentar a eficiência de aplicação via fertirrigação, é necessário um controle das taxas de nitrogênio aplicadas anualmente no solo, além da compreensão dos fatores intervenientes na mobilidade do ânion no solo.

O Padrão de molhamento e distribuição de nitrogênio após a fertirrigação através de uma fonte de pontual na superfície é afetado por muitas variáveis. Li, Zhang e Ren (2003) investigaram a influência da vazão dos emissores e do volume aplicado de água na distribuição do nitrogênio, enquanto os nutrientes eram continuamente aplicados a uma concentração constante a partir de uma fonte pontual na superfície. Com os resultados encontraram que o nitrato (NO_3^-) foi acumulado no limite do bulbo para qualquer combinação de taxa de aplicação e volume aplicado. Isto sugere que o nitrato seja suscetível ao movimento fora da zona da raiz caso haja um mau manejo da fertirrigação (LI; ZHANG; RAOC et al., 2004).

Exner et al. (1991) verificam movimento profundo de nitrato, em diferentes taxas de aplicação, sob condições de irrigação, cujos resultados indicam que 95% do nitrato aplicado foram lixiviados para baixo da zona radicular da cultura.

Altas concentrações de nitrato na água são problemáticas para potabilidade, pois no corpo humano, o nitrato tem o poder de reduzir a capacidade de transporte de oxigênio do corpo. Hubbard, Leonard e Jonhson (1991) afirmam que, mesmo quando esses valores estão acima de 10 mg/L, já provocam problemas de saúde em crianças; desta forma, é importante que se disponha de informações a respeito dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante a lixiviação, trocas iônicas e adsorção desses íons favorecendo a compreensão de como ocorre sua movimentação no solo.

Preocupações sobre a melhor prática de manejo estão aumentando porque a má aplicação de nitrogênio pode conduzir a contaminação do solo e fontes de água subterrâneas com também a degradação do solo. Altas concentrações de nitrato podem causar problemas de saúde (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1990). Um modo de administrar a poluição de nitrato é introduzir um método de irrigação alternativa que reduza o transporte químico através do solo, como também a quantidade de água aplicada. O gotejamento pode oferecer tal tecnologia (BUCKS et al. 1982).nitrato novo

2.6 Monitoramento da Salinidade no Solo

Usualmente, a otimização do dimensionamento e do manejo da fertirrigação via irrigação por gotejamento requer uma atenção especial para as técnicas de monitoramento da dinâmica do soluto no solo e necessidade de nutrição da planta. Todavia, existe uma dificuldade em determinar a atividade de um íon em dado ponto no solo. Pode-se utilizar a atividade média de um elemento no volume, entretanto, fica o questionamento de como determina-la. Existem técnicas nas quais o solo é saturado extraíndo-se, em seguida, a solução e medindo-se sua concentração. Nesta extração retira-se primeiramente a solução dos macroporos, que é menos concentrada e que,

conforme o solo seca, mais concentrada é a solução retirada. Por outro lado, nunca se consegue retirar toda água do solo (C. F. SOUZA¹).

Alternativamente, o monitoramento pode ser realizado a partir de medida da salinidade em amostras coletadas, determinando a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), ou usando extratos diluídos. No caso de extratos diluídos, o inconveniente é a necessidade de curvas de calibração para converter em CEes, que é a medida padrão da salinidade do solo (MEDEIROS, 2001).

Entre as técnicas utilizadas, o uso de extratores é bastante popular entre os pesquisadores por apresentar resultados precisos a um custo relativamente baixo. Entretanto, para medidas *in situ*, o acondicionamento de extratores reduz a precisão dos resultados, alterando o local em estudo (importante nos casos de medidas repetidas em pequena área) e limitando a obtenção de resultados em curto espaço de tempo. Para estimativas precisas da umidade e da concentração da solução do solo em laboratório e em campo, existe uma tendência para a utilização da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) (SOUZA et al., 2006).

As vantagens inerentes da técnica da TDR como a precisão, método não destrutivo, a não utilização de radiação ionizante, possibilidade de automação e acoplamento a dispositivos multiplicadores de leituras, pouca influência da textura, densidade e salinidade são justificativas fortes para a adoção cada vez maior da técnica, em substituição de outros métodos (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980; COELHO; OR, 1996). Sua principal desvantagem tem sido o custo, ainda alto para os padrões da agricultura nacional. Os valores apenas das guias de onda comparadas do fabricante de TDR chegam a ser compatível com os valores dos extratores.

A TDR tem sido usada para avaliação do movimento de solutos no solo (WARD; KACHANOSKI; ELRICK, 1995; NADLER; GAMLIEL; PERETZ, 1999; BEJAT et al., 2000; MMOLAWA; OR, 2000). Tal aplicação pode trazer benefícios para a pesquisa em fertirrigação, de forma dar subsídios ao entendimento da dinâmica de solutos sob diferentes manejos de fertirrigação.

¹ Comunicação Pessoal, Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Taubaté.

2.7 TDR

Diversos são os métodos para a determinação da umidade do solo, como o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além dos métodos indiretos, que estimam, a partir de outras propriedades do solo, tais como termalização de nêutrons, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo - TDR (SOUZA; MATSURA, 2002).

O método gravimétrico apresenta resultados precisos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial, mas para medidas no campo o acondicionamento e transporte das amostras podem reduzir a precisão dos resultados e, ainda, para amostragens repetidas em uma pequena área, podem causar interferência no local em estudo. O uso da sonda de nêutrons exige um treinamento especial para seu manuseio, principalmente pela presença de fontes radioativas (SOUZA; MATSURA, 2002).

O bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas o elemento sensor sofre deterioração com o tempo devido à interação com os compostos físico-químicos do solo (SELKER et al., 1993; COELHO; OR, 1996).

As vantagens inerentes da técnica da TDR, como a precisão, o fato de ser um método não destrutivo, a não-utilização de radiação ionizante e a possibilidade de automação e de acoplamento a dispositivos multiplicadores de leituras são justificativas fortes para a adoção cada vez maior da técnica em substituição a outros métodos (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980; COELHO; OR, 1996).

A TDR baseia-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de pulsos de microondas em cabos condutores envoltos por 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 variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variam entre 3 e 5, e a água possui 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 (CONCIANI et al., 1996).

No entanto, para o uso dessa metodologia, é necessária a confecção de uma curva de calibração para cada tipo de solo, sendo considerado um inconveniente normalmente aceitável comparado com as vantagens que apresenta em relação a outras técnicas (SOUZA et al. 2006). O uso de modelos empíricos de calibração da TDR que pressupõem que a relação entre a constante dielétrica aparente e o conteúdo de água do solo é dependente apenas deste último (TOMMASELLI; BACCHI, 2001). Várias pesquisas têm sido conduzidas com o intuito de encontrar uma relação entre a umidade do solo e a leitura obtida pelo TDR, porém nenhuma ainda é utilizável universalmente sem um procedimento de verificação, resultados de estudos dessa natureza poderão esclarecer dúvidas sobre a aplicabilidade desta técnica (CICHOTA, 2003).

2.8 Calibração

Calibração é o conjunto de operações que visam estabelecer, sob condições específicas, a relação entre valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição, valores representados por uma média materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. Suas finalidades principais são a apuração da confiabilidade das medições e a seleção ou o teste de viabilidade do uso de um instrumento ou sistema de medição (SEBRAE, 2001).

O processo de calibração consiste basicamente na coleta de dados (leituras) do aparelho ou sistema a ser calibrado; da coleta dos respectivos valores de referência e da análise da relação entre elas. Esta análise fornece a relação matemática ou estatística entre o valor de referência e a leitura do dispositivo calibrado, em adição, e talvez mais importante ainda, fornece a estimativa dos erros de medição. Erro é entendido como a diferença do valor real, que não pode ser conhecido e cuja estimativa é feita com base no valor de referência. A quantificação dos erros possibilita estimar a

incerteza atribuível à medição, ou seja, caracterizar a dispersão dos valores medidos atribuível ao mensuramento (VUOLO, 1999 apud CHICOTA, 2003).

Devido à especificidade dos solos é de bom tom que haja uma calibração dos equipamentos eletrônicos que lêem a umidade do solo, já que vários autores demonstraram que a calibração embutida nestes equipamentos, geralmente contém erros, pois tratam os solos de maneira geral, desconsiderando suas características específicas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no campus experimental Fazenda Areão, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- ESALQ/USP, no município de Piracicaba – SP (Lat. 22°42’; Long, 47°38’ Altitude de 435m). A temperatura média anual é de 21,4°, e o total anual de chuva é de 1257 mm. O experimento foi conduzido entre os meses de julho a agosto de 2007. O solo da área experimental é classificado como Nitossolo vermelho segundo a classificação brasileira de solos (Embrapa, 1999). A densidade média do solo é de 1210 kg m⁻³, e os valores de capacidade de campo e ponto de murcha permanente são: 0,45 m³ m⁻³ e 0,25 m³ m⁻³, e sua classe textural pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise granulométrica do solo, para as profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4m

Profundidade (m)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe Textural
0-0,2	28,53	26,41	45,06	Argilosa
0,2-0,4	28,92	24,57	46,51	Argilosa

3.1 Construção, Calibração e Instalação das sondas

As sondas foram construídas em parceria com o Lab. de Mecânica dos Solos da Universidade de Taubaté, seguindo procedimento descrito por Souza et al.(2006). Este tipo de sonda é largamente utilizado pelos usuários da técnica, os quais aplicam em seus trabalhos nas mais diferentes formas de penetração no solo: superficial ou em trincheiras. As sondas contínuas foram construídas com 3 hastes paralelas de aço inoxidável (AISI 304; Ø = 3 mm; L = 200 mm). As hastes foram cortadas com 220 mm de comprimento.

Um cabo coaxial (RG – 58; 50 Ω; L = 4 m) com um conector BNC em sua extremidade foi soldado nas três hastes, onde o condutor externo do cabo foi ligado nas 2 hastes laterais e interno na haste central (Figura 1). Para a soldagem foram utilizadas uma estação de solda elétrica e uma liga de estanho (Sn 63/37). Para permitir a fixação

do capacitor e do cabo coaxial nas hastes de aço inoxidável foi necessária a limpeza da superfície da haste com uma solução de ácido fosfórico a 1%.

Figura 1 - Detalhe constituinte das sondas de TDR (foto retirada de SOUZA et al., 2006)

O esqueleto da sonda de TDR (hastes e cabo coaxial) foi acomodado em um gabarito. Este gabarito foi fabricado com silicone (Figura 2) que servia de suporte para as hastes. A resina epóxi foi utilizada com o objetivo de formar um bloco resistente, promovendo sustentação do esqueleto da sonda e marcando o início da sonda (TDR 1001). Após 6 horas da aplicação do epóxi as sondas adquiriram resistência suficiente e puderam ser retiradas do interior do gabarito.

Figura 2 - Gabarito para confecção das sondas de TDR

Para estimar a condutividade elétrica, a técnica da TDR necessita da impedância característica de cada sonda em água destilada. De posse deste valor analisa-se a impedância causada pelo meio estudado, por isso que após a construção as sondas estas eram acondicionadas em vaso plástico contendo água destilada, cujas margens foram distanciadas 0,35 m das hastes, e então realizadas leituras através do

software “PCTDR” para determinar os valores da impedância. As sondas que tinham o valor diferente de até 5% da média (desvio padrão) foram selecionadas.

A instalação das sondas foi feita em trincheiras de 0,6 x 0,6 x 0,75 m (comprimento, largura e profundidade). Foram abertas 6 trincheiras e em cada uma foram instaladas, em posição de malha (Figura 3), 17 sondas localizadas a 0,5; 0,15; 0,25; 0,35 e 0,45 m de profundidade, e a 0,5; 0,15; 0,25; 0,35 m de distância do ponto do emissor, onde cada sonda representava uma área de 0,01 m², promovendo “medidas pontuais”. A distribuição das sondas foi baseada em Nogueira; Coelho e Leão (2000).

Figura 3 - Disposição das sondas no perfil do solo

Devido à diferença nas propriedades físicas do solo, e consequentemente, na distribuição de água no solo, ocasionadas pela movimentação do solo, as leituras só foram realizadas após período de reestruturação de aproximadamente 2 meses.

3.2 Umidade e condutividade elétrica

A comparação entre o sistema de gotejamento enterrado e superficial, para avaliar a distribuição da solução do solo, foi dividido em duas fases. A primeira com aplicação na superfície do solo e segunda a 0,10 m de profundidade. As vazões escolhidas foram as de 2 e 4 L/h, com três repetições.

Foi aplicado 1L de água a cada hora num total de 10 aplicações, o monitoramento da distribuição da solução foi realizado antes e após a aplicação, além

disso, foram contabilizados o tamanho da poça saturada formada no momento da infiltração e o avanço da frente de umedecimento, e poça saturada, da superfície do solo, por meio de uma régua milimetrada.

O nutriente usado foi o nitrato de potássio (KNO_3), devido ao princípio químico inerente a alguns íons que, quando disponibilizados na solução do solo, são rapidamente deslocados no perfil, como é o caso do nitrato e do potássio que apresentam grande mobilidade no solo. Assim, foi preparada solução de 2 dS/m, medida através da condutividade elétrica, sendo este valor semelhante aos observados em soluções utilizadas na fertirrigação (SOUZA; COELHO; VILLAS BOAS, 2006) e por apresentar riscos moderados de salinidade a água de irrigação.

As leituras de umidade e condutividade elétrica foram monitoradas através de Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific, Logan-Utah)² equipado com interface RS232, analisando o sinal eletromagnético automaticamente por um coletor de dados (CR1000 – Datalogger – Campbell Scientific). A programação das leituras foi baseada na aplicação da solução de um ponto de emissão por vez, com as 17 leituras sendo realizada, praticamente instantaneamente, com o auxílio de multiplexadores.

A constante dielétrica aparente (K_a) foi convertida em umidade volumétrica com base na equação de calibração encontrada por Tommaselli e Bacchi (2001), também utilizada por Silva (2005), e para a concentração do Nitrato de Potássio, foi realizada uma calibração através de comparação entre leituras feitas da condutividade elétrica obtida pela TDR e determinada pelo método da Pasta Saturada (RICHARDS, 1954), a partir de volume de solo representativo de cada sonda dentro do bulbo molhado formado após a última aplicação da solução no solo.

Estas medições foram analisadas com auxílio de gráficos em três dimensões, confeccionados no programa Surfer Mapping System¹, o que apresentou o perfil de distribuição do nutriente em função da umidade do solo, durante todo o ensaio, proporcionando informações básicas sobre a distribuição da solução no solo.

² Referências à marca registrada não constituem endosso por parte dos autores.

3.3 Sistema de Irrigação

A solução de água e fertilizante foi mantida em galões de 50L, e frequentemente eram feitas leituras com o condutivímetro para aferir a concentração de KNO_3 na água. Para garantir a vazão aplicada foram instalados nas linhas de polietileno ($\phi = 0,0125 \text{ m}$) gotejadores autocompensantes, previamente selecionados após teste de vazão. Uma bomba de 0,5 CV gerava pressões constantes de 18 mca, garantindo o efeito de autocompensação dos emissores.

Foram acoplados aos emissores, distribuidores de descarga com duas saídas, uma saída foi bloqueada e na outra foi instalado um microtubo (diâmetro interno = 3,0 mm), e esse foi colocado no solo para que não houvesse a necessidade de revolvimento para a instalação das linhas no gotejo enterrado. Os microtubos foram instalados com auxílio de trado rosca a profundidade de 0,10m (Figura 4).

Devido a alta pressão e ser utilizado um emissor por vez, um retorno para o tanque de alimentação foi instalado, que, além disso, fazia com que a solução ficasse sempre em agitação.

Figura 4 - Trado utilizado para instalação do sistema de gotejamento enterrado (esquerda) e distribuidor de descarga com microtubo

Foi adotado um volume central dentro do bulbo molhado para efetuar uma análise de uniformidade comparativa, com o propósito de entender as diferenças entre os valores de umidade e de concentração individuais estimadas dentro do volume de controle. Desta forma, os coeficientes de uniformidade de Christiansen (1941) foram

calculados para as umidades e concentrações estimadas após cada aplicação da solução, por meio da Equação 1, seguindo-se a metodologia adaptada por Ould Mohamed El-Hafedh, Daghari e Maalej (2001) e Wu e Gitlin (1983).

$$UC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n Xi - Xm}{nXm} \right) \quad (1)$$

em que:

UC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em % (Christiansen, 1942)

X_i - Umidade volumétrica estimada, m^3/m^3 ; ou concentração de nutriente estimado, dS/m;

X_m - Umidade volumétrica média, m^3/m^3 ; ou concentração média do nutriente, ds/m;

n - número de pontos estimados.

O volume de controle escolhido foi de 0,20 x 0,20 x 0,20 m, respectivamente, comprimento, largura e profundidade, tomando como referência o gotejador superficial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a discussão dos resultados os tratamentos foram codificados em:

ENT2 - Sistema de gotejamento enterrado de vazão 2 L/h;

ENT4 - Sistema de gotejamento enterrado de vazão 4 L/h;

SUP2 - Sistema de gotejamento superficial de vazão 2 L/h;

SUP4 - Sistema de gotejamento superficial de vazão 4 L/h;

Casaño (1998) comenta que um dos problemas ocasionados em sistemas enterrados é o entupimento por raízes ou entrada de partículas de solo, assim, para confirmar que nenhuma partícula afetou o volume de água aplicado, foram feitas observações antes e após as aplicações, não tendo sido encontrada nenhuma partícula.

Outro problema que poderia ter afetado os dados seria referente à qualidade das sondas. A avaliação da qualidade da sonda é avaliada pela baixa variação da impedância entre elas, aceitando uma variação de até 5%. A média da impedância das sondas construídas foi de 2,562 ($n = 349$), a partir daí o intervalo de sondas utilizado foi entre 2,677 e 2,446. Vinte e um por cento destas sondas foram descartadas, ficando ainda 273 aptas a instalação.

4.1 Disco Saturado e Área Superficial Molhada

Nas Figuras 5 e 6 são apresentados os dados referentes à área superficial molhada e ao disco saturado para as vazões de 2 e 4 L/h nos sistemas de gotejamento superficial e enterrado. Nota-se que não houve uma estabilização do crescimento da área molhada para os tratamentos de vazão 2 L/h, ocorrendo o contrário, estes se mostraram crescentes com o aumento do volume aplicado, o mesmo ocorrendo para os tratamentos de vazão 4 L/h.

Isto demonstra que a alta frequência promove armazenamento superficial da solução no solo mesmo após inúmeras aplicações, contrariando observações realizadas por Souza et al. (2007), os quais relatam que para um solo arenoso

aplicações contínuas de água via gotejamento promovem o fenômeno de lixiviação, sendo observado estabilização da área superficial molhada após 6 aplicações de 1 L em intervalos de 1 hora.

Figura 5 - Área superficial molhada para as Vazões de 2 e 4 L/h, no sistemas de gotejamento superficial e enterrado

Figura 6 - Disco Saturado para as Vazões de 2 e 4 L/h, nos sistemas de gotejamento superficial e enterrado

O sistema SUP4, em comparação aos outros tratamentos, demonstrou maior superfície molhada, no entanto, só sendo menor que o SUP2, apesar de da menor vazão. Um das explicações para esse fato é que a aplicação da solução ao solo para o SUP2 foi iniciada no dia 02/07/2007 as 10:30 hr e estas com intervalo um intervalo de 1 hora entre cada aplicação, fez com que o experimento avançasse durante à tarde, assim, com a falta de luminosidade nas horas mais próximas da noite o experimento teve que ser interrompido e reiniciado na manhã seguinte, durante este intervalo o solo foi mantido coberto com lona para não sofrer influência do orvalho, no entanto, nas

manhãs seguintes ocorreu aumento do bulbo sem ter havido acréscimo de água. Nos outros tratamentos, não houve tal problema.

A outra explicação para o aumento da maior área úmida para um sistema de menor vazão é que no ato das medições foram adotadas duas direções de onde sempre eram feitas as leituras e devido à formação desigual do bulbo molhado na superfície (Figura 7) e/ou pelo fato do solo não ter sofrido grandes alterações, pode ter ocorrido à extrapolação desses dados.

Figura 7 - Formação desigual da superfície molhada e sentido das leituras do bulbo

Com os gráficos ainda foi possível determinar que as regiões centrais do bulbo (próximos ao ponto de emissão) tendem a saturação superficial do solo durante a aplicação de água e, denomina-se disco saturado. Assim, quando havia formação de pequena lâmina de água na superfície esta era considerada como poça saturada e então medida (Figura 6). Ao contrário do ocorrido na superfície úmida, houve uma estabilização na formação do disco saturado para os sistemas SUP4 e ENT4. Embora tenha ocorrido afloração da umidade no ENT2, este não formou poça saturada na superfície, impossibilitando sua leitura, ocorrendo o mesmo em uma das três repetições do ENT4. As diferenças entre as áreas das poças saturadas foram de $0,0304 \text{ m}^2$ para

SUP4 e ENT4, e $0,0078 \text{ m}^2$ entre os sistemas superficiais SUP2 e SUP4. Não foi encontrada relação entre a área molhada e o disco saturado para o solo em estudo.

O termo área superficial molhada representa, como descrito acima, a área úmida do solo, ou também conhecida como disco úmido, no entanto a relação entre a área umedecida pelos gotejadores e a sua área representativa também tem a denominação de área superficial molhada, que depende de fatores relacionados ao espaçamento, vazão dos gotejadores e propriedades físicas do solo, porém a área mínima ideal para o dimensionamento do sistema não está ainda definida, sendo razoável, segundo Keller e Bliesner (1990) considerar-se uma percentagem inferior a 67% para regiões áridas e superior a 33% para regiões de irrigação. No caso do gotejo superficial os valores chegaram a 75,4% e a 67,59 %, respectivamente para os SUP2 e SUP4 e 41,3 e 51,22% para ENT2 e ENT4, respectivamente, tendo sido considerada como a área representativa do emissor a área calculada tomando como o raio a distância do emissor até a sonda mais distante horizontalmente (0,35 m).

Os diâmetros máximos obtidos pelos sistemas foram de 0,6 m para o SUP2, 0,47 m para o sistema enterrado ENT2, 0,58 e 0,49m para SUP4 e ENT4. Alves Júnior et al. (2004) encontraram, para o mesmo tipo de solo, diâmetro máximo molhado de 0,468 m, aplicando 4L de água ($Q = 2 \text{ L/h}$) e 0,548 m, aplicando 8L de água ($Q = 4\text{L/h}$), semelhante aos valores encontrados neste trabalho para as mesmas relações de volume aplicado por vazão, no volume de 4L aplicado com vazão 2 L/h o diâmetro máximo foi de 0,498 m, e no volume aplicado de 8L com vazão de 4L/h o diâmetro foi de 0,548, para os sistemas superficiais, no entanto, a forma de aplicação de água, do trabalho citado acima, foi contínua, sem intervalos.

Dessa forma pode-se concluir que a forma de aplicação, se contínua ou em intervalos, provoca pouca variação no diâmetro máximo superficial do bulbo.

4.2 Distribuição da água no solo

Nas Figuras a seguir (de 8 a 11) foram comparados os perfis de umidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) após cada aplicação de água no solo (de 1 a 10 L). Para uma melhor visualização cada isolinhas representa um acréscimo de $0,005 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Avaliando primeiramente a frente de umedecimento, que são estas linhas que dão forma ao bulbo, viu-se que as dimensões do bulbo, no perfil do solo, formado pelos sistemas enterrados são muito diferentes das formadas pelos sistemas superficiais. Nestes sistemas a frente de umedecimento ocorre principalmente nos três primeiros litros, com pouco aumento na forma; nos sistemas enterrados, nos três primeiros e nos últimos litros ocorreu maior aumento no sentido vertical, fazendo com que as frentes de molhamento chegassem as sondas mais profundas (0,45 m).

A profundidade máxima atingida no SUP2 foi de 0,15 m, Silva et al. (2003) aplicaram 8,38 L na superfície, e este volume atingiu a profundidade máxima de 0,40 m para a vazão de 2L/h sendo mais que o dobro que a SUP2.

Comparando as leituras realizadas na superfície com as feitas pelas sondas nota-se que ocorreu uma redução do bulbo com a profundidade, principalmente para o SUP2 e SUP4, relação também encontrada por Alves Júnior (2003) para o mesmo tipo de solo.

A aplicação do dobro da vazão (de 2 para 4 L/h) proporcionou um maior maiores dimensões do bulbo molhado vertical e horizontal, observação confirmada pelos autores Mendonça Júnior et al. (2003) e Silva et al. (2003), no entanto, os últimos autores discordam quanto ao movimento vertical, dizendo que este tende a diminuir. O aumento vertical nos sistemas enterrados é superior ao superficial em aproximadamente 0,30 m, discordando de Coelho, Vellame e Coelho Filho (2003) que acharam menores valores de expansão lateral para emissores enterrados.

Apesar da menor área superficial molhada, os sistemas enterrados, disponibilizaram água, para este solo e nestas condições, a uma maior distância do emissor. Segundo Silva et al. (2003) dentre outros fatores a umidade do solo pode interferir na formação do bulbo, principalmente nos sistemas enterrados, já que havia uma alta umidade ($0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) encontrada abaixo de 0,15 cm de profundidade, zona próxima a aplicação das vazões (0,10 m).

Com relação ao manejo da irrigação, foi notado que os sistemas enterrados proporcionaram ascensão da água à zona de germinação das sementes, fator que deve ser considerado na escolha da profundidade de instalação das linhas. Outro fator importante seria a possível perda de água ocasionada pelo sistema enterrado caso

fosse inserida uma cultura de sistema radicular pouco profundo, se adaptando neste caso o sistema convencional, resultado semelhante foi encontrado por (COELHO; VELLAME; COELHO FILHO, 2003).

Ainda vale ressaltar que as maiores diferenças de umidade (umidade após 10 L - Umidade inicial) foram de $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ - SUP2 ; $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ - SUP4; $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ - ENT2 e $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ - ENT4., variando pouco entre os sistemas, e estes aumentos de umidade por área foram maiores em locais próximos à sonda instalada a $0,05 \times 0,05\text{m}$, próximas ao ponto de emissão, mesmo para o sistema enterrado onde esta sonda ficava $0,05\text{m}$ acima. Monteiro (2007) trabalhando com gotejamento enterrado nas profundidades de $0,2$ e $0,4 \text{ m}$ encontrou maiores valores de umidade na profundidade de $0,5 \text{ m}$ durante o ciclo da cultura do melão.

Figura 8 - Comparação entre os perfis de umidade (m^3/m^3) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 2 L/h no sistema enterrado

Figura 9 - Comparação entre os perfis de umidade ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 4 L/h no sistema enterrado

Figura 10 - Comparação entre os perfis de umidade ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 2 L/h no sistema superficial

Figura 11 - Comparação entre os perfis de umidade ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 4 L/h no sistema superficial

Os dados de área do perfil bulbo (Figura 12), medidos a partir das Figuras 8 a 11, servem para confirmar as informações sobre a frente de molhamento realizados anteriormente. O aumento da área no perfil nos sistemas enterrados foi bem superior aos sistemas convencionais. No ENT4, o aumento da área após a décima leitura foi 4,6 vezes maior que a primeira leitura, esta diferença foi de 3,8 vezes no ENT2, enquanto que nos sistemas superficiais, o aumento foi de apenas 2 vezes. Pode-se assim inferir que há uma maior concentração de água nos sistemas superficiais.

Comparativamente, a área do bulbo formada pelo sistema ENT4 foi 8,2% maior que o ENT2, 67,3% maior que o SUP4 e 71,0% maior que o SUP2, Ben-Asher e Phene (1993) encontraram que o volume do bulbo enterrado foi 46% maior que o superficial, para um solo de textura franco-argilosa.

A estabilização do crescimento do bulbo formado no perfil do solo ocorreu após 3 L (3 horas) nos sistemas superficiais, contrariando os dados de Nogueira (1998) que, trabalhando em solo franco argiloso, disse ter havido estabilização após 24 horas.

Figura 12 - Comparação entre os perfis de umidade ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de aplicação da água no solo (1L)

4.3 Distribuição da Uniformidade e da Condutividade Elétrica no volume de controle

Na Figura 13 encontram-se os valores dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) para a umidade, calculados a partir da região de controle para as diferentes vazões e profundidades de aplicação. Os dados foram divididos em dois gráficos para facilitar a visualização.

Nota-se claramente que, inicialmente, os sistemas superficiais apresentaram melhores valores de uniformidade 28,22 e 20,31% (SUP2 e SUP4), esta situação foi mantida até a aplicação de 4L, para os sistemas de vazão 4L/h, e até os 7L, para os de vazão 2L/h, a partir desses pontos os sistemas enterrados demonstraram uma recuperação da uniformidade, através do aumento do volume de água aplicado. Em contrapartida, os sistemas superficiais iniciaram um decréscimo acentuado da uniformidade ficando abaixo de 5%, após o nono litro aplicado. Analisando o gráfico onde estão os sistemas de vazão 2 L/h, se fosse utilizado linhas ao invés de colunas seria possível verificar a formação de um X, formado pelo encontro das linhas do CUC_{SUP2} e CUC_{ENT2} , desse modo é possível supor que CUC_{SUP2} é inversamente proporcional a adição de água e o CUC_{ENT2} proporcional.

Os melhores valores de uniformidade foram, até os 4 L quase que totais do SUP2, após isso, o ENT4 apresentou todos os melhores valores nos últimos 6 L. Estes comentários, de forma negativa, também se encaixam nos sistemas ENT2 e SUP4, onde no sistema de vazão 2 foram encontrados os 4 piores valores até a vazão de 5L, e nos litros finais os piores valores couberam ao SUP4.

Figura 13 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para a umidade em função da vazão e do sistema para uma determinada região de controle

Na Figura 14 encontram-se os valores dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) para a condutividade elétrica, calculados a partir da região de controle para as diferentes vazões e profundidades de aplicação. Os dados foram divididos em dois gráficos para facilitar o entendimento.

Os CUCs calculados para a CE apresentaram melhores resultados que os CUC umidade, além de mostrar comportamento oposto, onde os melhores valores iniciais vieram dos sistemas enterrados apresentando valores de uniformidade 96,34 e 70,00% (ENT2 e ENT4). Nos dois sistemas (enterrado e superficial) as menores vazões apresentaram melhor comportamento em relação à maior e houve (para todos os tratamentos) menor variação dos dados em função do volume. Os melhores valores foram encontrados para o sistemas enterrados, sendo 8 dos 10 para o ENT2, em contrapartida, todos os menores valores de uniformidade para a condutividade elétrica. Vale ressaltar que estes foram superiores a 52,8%.

Figura 14 - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para a condutividade elétrica em função da vazão e do sistema para uma determinada região de controle

A uniformidade CUC_{CE} foi afetada negativamente na maioria dos casos com o acréscimo de volume aplicado. A junção de dados de CUC umidade e CUC CE (em função do volume) podem gerar subsídios na tomada de decisão na elaboração dos projetos de irrigação.

4.4 Análise dos dados de CE_{TDR} em função do extrato de saturação e concentração de Nitrato

A Figura 15 mostra os gráficos de dispersão entre os valores de $CE_{TDR}(dS/m)$ X $CE_{\text{Extrato de saturação}}(dS/m)$; $CE_{TDR}(dS/m)$ X Concentração de Nitrato (mg/L) e $CE_{\text{Extrato de saturação}}(dS/m)$ X Concentração de Nitrato (mg/L). As poucas variações de concentração, devido ao baixo número de dados observados fizeram com que não fosse possível determinar as regiões onde ocorre maior dispersão dos dados, além disso, o intervalo de umidade trabalhado foi de apenas 0,337 a 0,313 $m^3.m^{-3}$. Os graus de confiabilidade (R^2) em média igual foram iguais a 0,82.

Figura 15 - Gráficos de dispersão entre os dados obtidos com o TDR (CE – dS/m), Extrato de saturação(CE – dS/m) e o Cardy-Horiba (nitrato – mg/L)

Os valores das análises de variância das regressões estão dispostos na Tabela 2. Todas as equações foram significativas (1%), no entanto, esta significância não foi atingida para os parâmetros estimados “interseção” e “X2”.

Tabela 2 - Análises de variância das regressões das equações de calibração a partir dos dados do TDR

Relação	Prob> F	Erro padrão	Estimativa dos parâmetros		
			Interseção*	X1	X2*
TDR X Extrato	0,0001	0,026652	0,693	1,443	-2,42
TDR x Nitrato	0,0001	23,90	454,33	1133,88	-1922,7

* não significativos a 5%

As equações geradas pela regressão foram:

- Para estimar a CE pasta a partir dos dados de CE_{TDR} e θ_{TDR}

$$CE_{pasta} = 0,694 + (1,44 \times CE_{TDR}) - (2,421 \times \theta_{TDR})$$

Onde :

CE pasta : Condutividade elétrica obtida pelo extrato de saturação do solo (dS m^{-1});

CE_{TDR} : Condutividade elétrica obtida pelo equipamento de TDR (dS m^{-1});

θ_{TDR} : valor de umidade obtido pela equação de calibração do solo em função da constante dielétrica do meio ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$).

- Para estimar a concentração de nitrato a partir da CE_{TDR} e θ_{TDR}

$$\text{Nitrato} = 454,325 + (1133,876 \times CE_{TDR}) - (1922,78 \times \theta_{TDR})$$

Onde :

Nitrato : Concentração de nitrato obtido pelo CARDY-HORIBA (mg/L);

CE_{TDR} : Condutividade elétrica obtida pelo equipamento de TDR (dS m^{-1});

θ_{TDR} : valor de umidade obtido pela equação de calibração do solo em função da constante dielétrica do meio ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$).

Como descrito acima, devido ao baixo número de dados observados e a uma pequena faixa de umidade utilizada fazem com que o uso destas equações seja restrito.

4.5 Distribuição da CE no solo

Nas Figuras a seguir (de 16 a 19) serão comparados os perfis de condutividade elétrica (dS m^{-1}) após cada aplicação de nitrato de potássio (KNO_3) no solo (de 1 a 10 L) para as vazões de 2 e 4 L/h no sistema superficial e enterrado. Para uma maior visualização cada isolinha representa um acréscimo de $0,03 \text{ dS m}^{-1}$. A CE é a forma de estimar a concentração de solutos na prática, portanto foi adotado esta como medida padrão na confecção dos gráficos.

Os gráficos de CE tiveram uma relação, quanto ao tamanho, bem próxima dos bulbos formados pela umidade. Na maioria dos casos, estes foram menores ou semelhantes, mas também apresentaram regiões maiores, como exemplo o bulbo formado a partir do sexto volume aplicado no ENT4, onde a largura superficial foi menor e à medida que o bulbo se aprofundava o bulbo de CE aumentava a área em relação ao mesmo bulbo úmido. Houve também o caso em que a maioria dos bulbos de CE foram

superiores aos bulbos úmido, isto ocorreu nos sistemas superficiais, a influência ocorreu devido à alta umidade inicial no solo (já comentada acima), principalmente na profundidade de 0,15 m, que é o local onde se inicia o aumento do bulbo de CE (gráfico de 2L no SUP4 e 5L no SUP2), tendo, assim, influenciado na distribuição dos sais no solo.

Não foi notada estabilização do crescimento do bulbo em nenhum dos tratamentos, no entanto, tomando a isolinha referente a $0,14 \text{ dS m}^{-1}$ nota-se que houve uma padronização no crescimento. Isto ocorreu principalmente a partir dos 4L nos sistemas SUP2, SUP4 e ENT4. No ENT2, entre os 3 e 5L a mesma isolinha tende a estabilizar, no entanto, a partir dos 6L dar-se início a um maior alargamento do bulbo, na faixa de profundidade entre 0,5 e 0,15 m – entre o ponto de emissão, atingindo largura superior ao ENT4, acompanhando o ocorrido no bulbo úmido. Este fenômeno deve ter ocorrido devido à menor taxa de aplicação.

Comparando os sistemas de menor vazão, apesar da influência sofrida pela umidade inicial no solo na distribuição dos sais, a área do ENT2 é claramente superior ao sistema SUP2, disponibilizando sais a uma distância bem superior ao ponto de emissão, não sendo esta superioridade tão grande entre o ENT4 e SUP4. Os maiores valores de CE encontrados foram de 0,38, 0,33, 0,31 e $0,29 \text{ dS m}^{-1}$ para o ENT4, SUP4, ENT2 e SUP2, respectivamente.

Com relação às interações entre os diferentes perfis (umidade *versus* concentração), observou-se uma distribuição em gradiente da solução no solo, sendo encontrado os maiores valores de CE da solução próximo ao ponto de emissão (0,38, 0,33, 0,31 e $0,29 \text{ dS m}^{-1}$ para o ENT4, SUP4, ENT2 e SUP2, respectivamente) e, conseqüentemente, uma diminuição desta, à medida que se aproxima da frente de molhamento, mesmo resultado encontrado por Souza et al. (2007) para um solo mais arenoso. Entretanto, quando se analisa a distribuição da massa do nitrato de potássio dentro do bulbo molhado verifica-se uma movimentação que acompanha o fluxo da água em todos os ensaios analisados, notando-se uma tendência à lixiviação no solo próximo ao gotejador após algumas aplicações sucessivas em conseqüência da movimentação do KNO_3 em direção a extremidade do bulbo.

Uma hipótese para este fenômeno pode ser baseada no fato de que, os íons acompanham a frente de avanço da água, sendo que esta se movimenta um pouco à frente dos sais, em direção ao extremo do bulbo. Segundo Blanco e Folegatti (2001, 2002) os sais movimentam-se mais lentamente no solo do que à frente de avanço da água (fluxo de massa), o que proporcionará uma distribuição heterogênea da concentração destes. Outra observação está baseada na CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo (RIVERA, 2004), ou seja, o potássio da solução do solo interagiu com o complexo de troca de cátions, sendo, portanto este elemento retido no solo na região mais próxima ao ponto de aplicação, de forma que a solução que se deslocou para as regiões mais extremas do bulbo molhado possuía uma concentração iônica menor.

Levando em consideração o manejo da fertirrigação notamos que o sistema que não apresentaria perda de nutrientes por lixiviação (tomando como referência a área do gráfico 0,5 x 0,35m) seria apenas o SUP2, dado importante já que o consumo (aplicação) de nutrientes ao solo tem relação direta tanto no custo de produção quanto, quando ocorre o mau uso, no impacto ambiental ocasionado pela lixiviação dos sais.

Figura 16 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m⁻³) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 2 L/h no sistema enterrado

Figura 17 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m^{-3}) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 4 L/h no sistema enterrado

Figura 18 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m^{-3}) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 2 L/h no sistema superficial

Figura 19 - Comparação entre os perfis de distribuição de CE (dS.m⁻³) ao final do processo de aplicação da água no solo (1 a 10L). Vazão de 4 L/h no sistema superficial

5 CONCLUSÕES

Em relação aos sistemas superficiais, os sistemas enterrados: apresentaram menor área superficial molhada; atingiram uma maior largura e profundidade em relação ao ponto de emissão.

A forma de aplicação, se continua ou em intervalos, provoca pouca variação no diâmetro máximo superficial do bulbo.

Não foi possível mensurar a poça saturada no sistema ENT2, e em ambos tratamentos enterrados ocorreu ascensão da umidade à superfície.

Nos sistemas superficiais a água encontra-se mais concentrada.

A umidade inicial do solo influencia a formação do bulbo úmido e o movimento dos sais no solo.

Os sistemas enterrados tenderam a melhorar a uniformidade de umidade com o aumento do volume de água aplicado, enquanto o sistema superficial apresenta efeito inverso e não é possível relacionar a melhor uniformidade de umidade com o tipo de vazão nem com a profundidade de aplicação.

A uniformidade de sais distribuídos no volume de controle é afetada negativamente pelo aumento do volume aplicado.

As equações geradas para determinar a $CE_{\text{pasta saturada}}$ (dS/m) e a concentração de Nitrato (mg/L) a partir da CE_{TDR} (dS/m) mostraram ser significantes a 1 %, no entanto, seus usos devem ser restritos a uma faixa de umidade entre 0,313 e 0,337 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$.

As maiores concentrações de água e condutividade elétrica foram obtidas próximas ao ponto de emissão.

A definição da profundidade ideal é uma função que envolve vários fatores tais como: profundidade efetiva do sistema radicular da cultura a ser irrigada, tipo, volume de água aplicado etc.

REFERÊNCIAS

- ALVES JÚNIOR, J.; LOURENÇÃO, M.S.; SILVA, T.J.A., SILVA, C.R.; FOLEGATTI, M. V. Distribuição do sistema radicular de plantas jovens de lima ácida 'Tahiti' sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 3, p. 270-281, 2004.
- AYARS, J.E.; PHENE, C.J.; HUTMACHER, K.R.; SCHONEMAN, R.A.; VAIL, S.S.; MEAD, R.M. Subsurface drip irrigation in row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 42, p. 1-27, 1999.
- AYARS, J.E.; PHENE, C.J.; SCHONEMAN, R.A.; MESO, B.; DALE, F.; PENLAD, J. Impact of bed location on the operation of subsurface drip irrigation systems. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., 1995, Orlando. **Proceedings ...** St. Joseph: ASAE, 1995. p. 141-146.
- BAR-YOSEF, B. Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in sand dunes; water, N and P distribution in soil and uptake by plants. **Journal of Agronomy**, Madison, v. 69, p. 486-491, 1977.
- BEJAT, L.; PERFECT, E.; QUINSENBERRY, V.L.; COYNE, M.S.; HASZLER, G.R. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 818- 826, 2000.
- BEN-ASHER, J.; PHENE, C.J. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. In: JORGENSEN, G.S.; NORUM, K.N. **Subsurface drip irrigation. Theory, practices and application**. Fresno: California Center of Irrigation Technology. 1993. p.185-201.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 76 - 80, 2001.
- _____. Salt accumulation and distribution in a greenhouse soil as affected by salinity of irrigation water and leaching management. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 414 - 419, 2002.
- CAMP, C.R. Subsurface drip irrigation: a review. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 41, p. 1353–1367, 1998.
- CASAÑO, C. **Informacion geral**: riego por goteo subterráneo en olivar. Valencia: Mondragon, 1998. 7 p.
- CHRISTIANSEN, J.E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural Engineering**, New York, v. 22, p. 89-92, 1941.

CICHOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. 2003. 121p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior da Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CLOTHIER, B.E.; SAUER, T.J. Nitrogen transport during drip fertigation with urea. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 345-349, 1988.

COELHO, E.F.; OR, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v. 39, p. 2007-2016, 1996.

_____. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 206, p. 123-136, 1999.

COELHO, E.F.; OR, D.; SOUSA, V.F. Avaliação de parâmetros hidráulicos para modelos de distribuição de água no solo sob gotejamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 651-657, abr. 1999.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. Umidade do solo por reflectometria no domínio do tempo (tdr) com uso de diferentes testadores de cabos e multiplexadores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais ...** Goiânia: SBEA, 2003. p. 76-85.

CONCIANI, W.; HERRMANN, P.S.P.; MACHADO, S.L.; SOARES, M.M. O uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para determinação da umidade do solo in situ. **Revista Solos e Rochas**, São Paulo, v. 19, p. 189-199, 1996.

DAVIS, R.M.; JUNIOR, G.N.; DAVIS, H. Development aspects of field-to-field variations in selected cataloupe characteristics (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus* Naud.). **Hilgardia**, Berkeley, v. 38, p. 165-180, 1967.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 212 p.

EXNER, M.E.; BURBACH, M.E.; WATTS, D.G.; SHEARMAN, R.C.; SPALDING, R.F. Deep nitrate movement in the unsaturated zone of simulated urban lawn. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 20, p. 658-662, 1991.

FARIA, L.F. **Variação de vazão de gotejadores enterrados na irrigação de citros e café**. 2002. 87 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GARNIER, E.; BERGER, A.; RAMBAL, S. Water balance and pattern of soil water update in a peach orchard. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 11, p. 145-158, 1986.

GOLBERG, D.; SHMUELI, M. Drip irrigation: a method used under arid desert conditions of high water and soil salinity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 13, p. 38- 41, 1970.

GOLDBERG, D.; CORNAT, B.; BAR-YOSEF, B. Distribution of roots, water and minerals as a result of trickle irrigation. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Lexington, v. 96, p. 645-648, 1971.

GOMES, E.P.; SOUSA, A.P. Produtividade da Alface (*Lactuca sativa* L.) em função dos valores de lâminas de água aplicados por gotejamento superficial e subsuperficial. **Irriga**, Botucatu, v.7, n.1, p. 35-41, 2002.

GREEN, S.R.; CLOTHIER, B.E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. **Plant Soil**, Dordrecht, v.173, p.317-328, 1995.

HAGIN, J.; LOWENGART, A. Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. . **Fertilizer Research**, Media, v.43, p.5-7, 1996.

HAMZA, M.; ALYMORE, L.A.G. Soil solute concentration and water uptake by single lupin and radish plant roots. 1. Water extraction and solute accumulation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 145, p. 187- 196, 1992.

HOCHMUTH, G.J. Fertilizer management with drip irrigation for vegetables. Using plasticulture technology for the intensive production of vegetable crops. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Lexington, v. 43, n. 7, p. 16-22, 1994.

HUBBARD, R.K.; LEONARD, R.A.; JOHNSON, A.W. Nitrate transport a sandy coastal plain soil underlain by plinthite. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, p. 802-808, 1991.

KELLER, J. **Sprinkler and trickle irrigation**. Logan: Utah State University, 1984. 133 p.

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

LAZAROVITCH, N.; WARRICK, A.W.; FURMAN, A.; SIMUNEK, J. Subsurface water distribution from drip irrigation described by moment analyses. **Soil Science of America Journal**, Madison, v. 6, p. 116-123, 2007.

LI, J.; ZHANG, J.; RAOC, M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v. 67, p. 89–104, 2004.

LI, J.; ZHANG, J.; REN, L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, p. 19–30, 2003

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. Profundidade de instalação da linha de gotejadores em tomateiro para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 2, p. 206-210, 2002.

MEDEIROS, J.F. Salinização em áreas fertirrigadas: manejo e controle. In: FOLEGATTI, M.V.; CASARINI, E.; BLANCO, F.F.; BRASIL, R.P.C.; RESENDE, R.S. (Coord.). **Fertirrigação**: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 201-240.

MENDONÇA JÚNIOR, C.F.; LEVIEN, S.L.A.; MEDEIROS, J.F.; MATOS, J.A.; MEDEIROS, P.R.F.; BARROS, A.D. Dimensões de bulbo úmido em solos utilizados na irrigação por gotejamento superficial: luvisolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais ...** Goiânia: SBEA, 2003. p. 228-232.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 222, p. 163-190, 2000.

MONTERIO, R.O.C. **Influência do gotejamento subterrâneo e do “mulching” plástico na cultura do melão em ambiente protegido**. 2007. 178 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects of salinity effect on TDR-measurement water content: a field study. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1070-1076, 1999.

NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M. Bulbo infiltrômetro. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., 1988, Florianópolis. **Anais ...** Florianópolis: ABIRD, 1988. p. 1207-1218.

NEWBOULD, P. The use of nitrogen fertilizer in agriculture. Where do we go practically and ecologically? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 115, p. 297-311, 1989.

NOGUEIRA, C.C.P. **Dinâmica da água num solo podzólico vermelho amarelo sob irrigação localizada superficial e subsuperficial**. 1998. 60 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1998.

NOGUEIRA, C.C.P.; COELHO, E.F.; LEÃO, M.C.S. Características e dimensões do volume de um solo molhado sob gotejamento superficial e subsuperficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 315-320, 2000.

ORON, G.; DEMALACH, J.; ZAFIR, H.; CIBOTARU, R. Subsurface microirrigation with effluent. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 1, p. 25-36, 1991.

ORON, G.; DEMALACH, Y.; GILLERMAN, L.; DAVID, I. Pear response to saline water application under subsurface drip irrigation. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., 1991, St. Joseph. **Proceedings ...** St. Joseph: ASAE, 1991. p. 97-103.

OULD MOHAMED EL-HAFEDH, A.V.; DAGHARI, H.; MAALEJ, M. Analysis of several discharge ratespacing- duration combinations in drip irrigation system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 52, p. 33-52, 2001.

PAPADOPOULOS, I. Constant feeding of field-grown tomatoes irrigated with sulphate water. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 88, p. 231-236, 1985.

PHENE, C.J.; SANDERS, D.C. High-frequency trickle irrigation and row spacing effects on yield and quality of potatoes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 773-776, 1976.

PHENE, C.; DAVIS, K.R.; HUTMACHER, R.B.; BAR-YOSEF, B.; MEEK, D.W.; MISAKI, J. Effect of high frequency subsurface and surface drip irrigation on root distribution of sweet corn. **Irrigation Science**, Berlin, v. 12, p. 135-140, 1991.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF):** goteo, microaspersión, exudación. Madrid: Ed. Mundi-Prensa, 1987. 461 p.

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

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: USDA, 1954. 160 p. (USDA. Agricultural Handbook, 60).

RIVERA, R.N.C. **Modelagem da dinâmica da água e do potássio na irrigação por gotejamento superficial.** 2004, 89 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Metrologia:** calibração. Disponível em: <<http://www.sebrae-sc.com.br/sebraetib/metrologia/calibracao>>. Acesso em: 04 out. 2001.

SILVA, C.A.; MATOS, J.A.; MEDEIROS, J.F.; LEVIEN, S.L.A. Dimensões de bulbo úmido em solos utilizados na irrigação por gotejamento superficial: argissolo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais ...** Goiânia: SBEA, 2003. p. 224-228.

SILVA, R.C. **Evapotranspiração e desenvolvimento de limeira ácida 'tahiti' na ausência e presença de estresse hídrico.** 2005. 99 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SORENSEN, R.B.; WRIGHT, F.S.; BUTTS, C.L. Subsurface drip irrigation system designed for research in row crop rotation. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 17, n. 2, p. 171-176, 2001.

SOUSA, V.F.; COELHO, E.F.; VILLAS BÔAS, R. Cálculo e preparo das soluções fertilizantes. In: BOARETTO, A.E.; VILLAS BÔAS, R.; SOUSA, V.F.; PARRA, I.R.V. **Fertirrigação: teoria e prática**. Piracicaba: CENA, 2006. p. 161-181.

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.

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V.; MATSURA, E.E.; OR, D. Calibração da reflexotometria no domínio do tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 282-291, jan./abr. 2006.

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V.; SILVA, E.F.F.; SILVA, C.R. Distribuição e armazenamento da solução no solo para o manejo da fertirrigação por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. **Anais ...** Bonito: SBEA, 2007. p. 1-4.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; FOLEGATTI, M.V.; COELHO, E.F.; OR, D. Sondas de tdr para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 1, p. 12-25, jan./mar. 2006.

SOUZA, E.A.; COELHO, E.F.; PAZ, V.P.S.; DA SILVA, T.S.M. Distribuição da umidade num latossolo irrigado por gotejamento superficial e enterrado, com uso de tdr. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Anais ...** Goiânia: SBEA, 2003. p. 67-72.

SOUZA, V.F.; COELHO, E.F. Manejo de fertirrigação em fruteiras. In: FOLEGATTI, M.V.; CASARINI, E.; BLANCO, F.F.; BRASIL, R.P.C.; RESENDE, R.S. (Coord.). **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 289-317.

SPALDING, R.F.; EXNER, M.E.; LINDAU, C.W.; EATON, D.W. Investigation of sources of groundwater nitrate contamination in the Burbank Wallula area of Washington, USA. **Journal Hydrology**, Amsterdam, v. 58, p. 307-324, 1982.

SUAREZ-REY, E.; CHOI, C.Y.; WALKER, P.M. **Feasibility of subsurface drip irrigation on turf in Arizona**. St. Joseph: ASAE, 1999. 20 p. (ASAE. Paper, 992251).

THORBURN, P.J.; COOK, F.J.; BRISTOW, K.L. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, p. 121-127, 2003.

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

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: mensuarements in coaxial transmission lines. **Water Resource Research**, St. Louis, v. 16, p. 574-582, 1980.

VAZIRI, C.M.; GIBSON, W. Subsurface and drip irrigation for Hawaiian sugarcane. In: REPORT HAWAIIAN SUGAR TECHNOLOGY ANNUAL CONFERENCE, 1972, Honolulu. **Proceedings** ... Honolulu: Hawaiian Sugar Planters Assoc., 1972. p. 18-22.

WARD, A.L.; KACHANOSKI, R.G.; ELRICK, D.E. Analysis of water and solute transport away from a point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 3, p. 699-706, 1995.

WU, I.P.; GITLIN, H.M. Drip irrigation application efficiency and schedules. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 26, p. 92-99, 1983.