

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Leonardo do Nascimento Lopes

**MONITORAMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE NITRATO DE
POTÁSSIO EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO
COM USO DA TÉCNICA DA TDR**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre pelo Curso do Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais da
Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Ciências Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza

Taubaté-SP

2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**Ficha catalográfica elaborada pelo
SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

L864m Lopes, Leonardo do Nascimento
 Monitoramento de uma solução de nitrato de potássio em um
 latossolo vermelho-amarelo com uso da técnica da TDR / Leonardo do
 Nascimento Lopes. - 2009.
 71f. : il.

 Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade de
 Taubaté, Departamento de Ciências Agrárias, 2009.
 Orientação: Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza, Departamento de
 Ciências Agrárias.

 1. Reflectometria no Domínio do Tempo - TDR. 2. Conteúdo de água.
 3. Volume de solo molhado. I. Título

**MONITORAMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE NITRATO DE POTÁSSIO EM UM
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO COM USO DA TÉCNICA DA TDR**

LEONARDO DO NASCIMENTO LOPES

Dissertação aprovada em 02/02/2009

Comissão Julgadora:

Membro	Instituição
Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza	Universidade Federal de São Carlos - (UFSCar)
Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – (ESALQ/USP)
Prof. Dr. Marcelo dos Santos Targa	Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Prof. Dr. Claudinei Fonseca Souza

Orientador

Dedico este trabalho as pessoas que muito admiro,
minha esposa Kátia meu pai Isaltino e meu
orientador e amigo Prof. Dr. Claudinei.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me mostrar o caminho diante das decisões mais difíceis;

Ao professor Dr. Claudinei Fonseca Souza, primeiramente pela amizade durante a confecção deste trabalho, pelo suporte, orientação, paciência e pela oportunidade de trabalhar e aprender muito ao seu lado;

A Universidade de Taubaté - UNITAU, pela oportunidade de aperfeiçoar e adquirir novos conhecimentos;

A Fundação e Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro;

A todos os colegas do curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais;

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais;

Ao coordenador do curso Pós-Graduação em Ciências Ambientais Prof. Dr. Marcelo Targa, pelo suporte oferecido;

Aos amigos Deniz e Gilvan, que pelo incentivo colaboraram direta e indiretamente para realização deste trabalho;

Aos amigos de jornada Bruno Santoro e Lucas pela boa vontade, dedicação e companheirismo;

Ao professor Antônio Cláudio e a técnica de laboratório Simone pela colaboração e auxílio nos laboratórios de águas e mecânica dos solos;

Aos alunos e ex-alunos de graduação: Elton, Clodoaldo, Marcelo, Letícia, Davidson, Rosiane, Bruno Almeida, Allan (ESALQ).

Ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, pelo suporte estrutural;

A todos que colaboraram para realização deste trabalho.

RESUMO

MONITORAMENTO DE UMA SOLUÇÃO DE NITRATO DE POTÁSSIO EM UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO COM USO DA TÉCNICA DA TDR

O conhecimento da movimentação da água no solo é de grande importância para a agricultura, pois a água é um dos fatores que mais influenciam no rendimento das culturas. Das várias técnicas utilizadas para o monitoramento do conteúdo de água no solo, a reflectometria no domínio do tempo (TDR) vem sendo bastante difundida entre os pesquisadores por apresentar inúmeras vantagens, dentre as quais a mensuração em tempo real e a possibilidade de leituras automatizadas. Com o objetivo de avaliar a movimentação da água num perfil de um Latossolo vermelho-amarelo, conduziu-se um experimento obtendo-se os valores de umidade do solo e condutividade elétrica através das leituras de um equipamento de TDR com sondas instaladas em uma trincheira em diversas profundidades (0,10 m a 0,60 m) e com diferentes taxas de aplicação (2, 4 e 8 L.h⁻¹) de solução em intervalos de 1 hora, via irrigação por gotejamento. A partir dos resultados obtidos, pôde concluir-se que diferentes vazões de aplicação determinam características particulares de formação do bulbo molhado e da movimentação da solução no solo. Para as condições de solo e de acordo com o volume e a frequência utilizada durante este experimento, recomenda-se a aplicação de pequenas quantidades de solução em intervalos mais frequentes para reduzir a perda por percolação de água e solutos.

Palavras-chave: Reflectometria no domínio do tempo – TDR; conteúdo de água; volume de solo molhado

ABSTRACT

MONITORING OF A NITRATE AND POTASSIUM SOLUTION IN A RED YELLOW LATOSSOLO WITH USE OF THE TECHNICIAN TDR

The knowledge of the water distribution in soil has great importance to the agriculture because of the crop yield the cultures income has a direct influence by the water. There are many techniques used to monity soil moisture, and the time domain reflectometry (TDR), has a satisfactory application among the researches because the advantages, allow the real time measurements can be automatized and the automatized. With the objective to appraise the water distribution and electrical conductivity in a Red-yellow Latosol profile, the experiment was conducted measuring soil moisture through the TDR equipment reading with probes fixed in a trench in various depths (0,10 m to 0,60 m) and with different applications rates of solution (2,4 and 8 L.h⁻¹) , with one hour interval by dripping irrigation. The results allowed us to that the different sewages applications determinate the particular characteristics of the wet bulb arrangement and the water soil distribution. For the soil conditions and according to the volume and frequency used during this experiment, it is recommended to apply of small quantities of a solution at more frequent intervals to reduce the loss by percolation of water and solute.

Keywords: Time domain reflectometry -TDR; water content; wetted soil volume

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Casa de vegetação.....	28
Figura 2 – Armação das sondas de TDR.....	30
Figura 3A - Gabarito construído para aplicação da resina.....	30
Figura 3B - Estrutura construtiva da sonda de TDR.....	30
Figura 4A - Trincheira aberta para a instalação das sondas de TDR.....	31
Figura 4B - Disposição final das sondas instaladas.....	31
Figura 5A - Acomodação do solo na trincheira.....	32
Figura 5B - Trincheira fechada com o mesmo solo retirado.....	32
Figura 6 – Sistema de frasco de Mariote utilizado no ensaio.....	33
Figura 7 – Detalhe dos multiplexadores para automação das leituras.....	34
Figura 8 – Processo de formação do disco saturado e frente de umedecimento.....	35
Figura 9 – Medidas de condutividade elétrica do extrato de saturação.....	36
Figura 10 - Relação entre os valores de condutividade elétrica pela técnica da TDR (CE_{TDR}) e condutividade elétrica obtida pelo extrato de saturação (CE_s).....	39
Figura 11 - Processo de medição do disco saturado e frente de umedecimento.....	40
Figura 12 - Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observado para os ensaios após as aplicações de $2 L.h^{-1}$	41
Figura 13 - Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observado para os ensaios após as aplicações de $4 L.h^{-1}$	41
Figura 14 - Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observado para os ensaios após as aplicações de $8 L.h^{-1}$	42
Figura 15 - Perfis de umidade do solo ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de KNO_3 para vazão de $2 L.h^{-1}$	46
Figura 16 - Perfis de umidade do solo ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de KNO_3 para vazão de $4 L.h^{-1}$	47
Figura 17 - Perfis de umidade do solo ($m^3.m^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de KNO_3 para vazão de $8 L.h^{-1}$	48
Figura 18 - Perfis de condutividade elétrica do solo (dS/m) ao final do processo de infiltração de cada aplicação da solução de KNO_3 para vazão de $2 L.h^{-1}$	50

Figura 19 - Perfis de condutividade elétrica do solo (dS/m) ao final do processo de infiltração de cada aplicação da solução de KNO_3 para vazão de 4 L.h^{-1}	51
Figura 20 - Perfis de condutividade elétrica do solo (dS/m) ao final do processo de infiltração de cada aplicação da solução de KNO_3 para vazão de 8 L.h^{-1}	52
Figura 21 – Análise dimensional dos bulbos.....	57
Figura 22 - Umidade média no volume de controle após a aplicação de água.....	59
Figura 23 – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para umidade em função da vazão aplicada	60
Figura 24 – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para a condutividade elétrica em função da vazão aplicada.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-hídricas e químicas do solo na camada de 0,60 m.....	29
Tabela 2 – Volume de solução para o perfil de distribuição no solo.....	54
Tabela 3 – Concentração de solução para o perfil de distribuição no solo.....	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Irrigação por gotejamento.....	15
2.2 Forma e dimensões do bulbo molhado.....	16
2.3 Dinâmica do soluto no bulbo molhado.....	19
2.4 Condutividade elétrica.....	20
2.5 Contaminação das águas por nitrato	22
2.6 Uso da técnica do TDR.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1 Confeção das sondas de TDR.....	29
3.2 Instalação das sondas de TDR na trincheira.....	31
3.3 Condução do ensaio.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Análise dos dados experimentais.....	38
4.2 Disco saturado <i>versus</i> área superficial molhada.....	39
4.3 Distribuição e armazenamento da água no solo.....	43
4.4 Distribuição da solução do solo (KNO ₃).....	49
4.5 Análise dimensional dos bulbos.....	56
4.6 Análise de uniformidade de distribuição da solução no solo.....	58
5 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

Na agricultura, a irrigação é fundamental para eliminar o risco de deficiência hídrica nos cultivos, aumentar a produtividade, garantir a produção de alimentos e intensificar o uso da terra. Por outro lado, a elevada demanda de água em projetos de irrigação no Brasil exige racionalização no seu uso por meio de alternativas que proporcionem maior eficiência no uso da água.

Christofidis (1999) mostra que o método de irrigação por superfície continua a ser o mais utilizado no Brasil, com cerca de 1,7 milhões de hectares (59%), predominante na região Sul, principalmente para a irrigação por inundação na cultura do arroz, enquanto a irrigação por aspersão prevalece nas demais regiões (35%). A localizada representa a menor área, com 182 mil ha em fase de crescimento, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste.

A irrigação por gotejamento é caracterizada pela aplicação de pequenas quantidades de água em alta frequência e diretamente na zona radicular. Isto permite manter a umidade próxima ao limite superior de disponibilidade de água em um determinado volume de solo (DASBERG e BRESLER, 1985).

Segundo Folegatti e Casarini (1999), fertirrigação é a técnica de adubação das culturas onde, os fertilizantes são dissolvidos na água de irrigação. Portanto, a fertirrigação é uma técnica que utiliza a água de irrigação como um veículo para os nutrientes chegarem até as raízes das plantas.

No Brasil, a aplicação de fertilizantes por meio de sistemas de irrigação, a fertirrigação vem se firmando nos últimos anos como uma técnica muito promissora, principalmente entre os usuários de sistemas de irrigação localizada e pivô-central. De acordo com Coelho (1999), o nitrogênio é o elemento mais frequentemente aplicado via água de irrigação por apresentar,

em relação aos outros nutrientes alta mobilidade no solo e conseqüentemente, alto potencial de perdas, principalmente por lixiviação. Com o uso da fertirrigação, pode-se parcelar a aplicação dos fertilizantes nitrogenados de acordo com a demanda da cultura, reduzindo as perdas sem onerar o custo de produção. A eficácia do gotejamento, entretanto, depende do manejo racional de todo o sistema, inclusive da fertirrigação (MAROUELLI e SILVA, 2000).

Apesar do uso difundido da fertirrigação via irrigação por gotejamento, informações sobre o movimento simultâneo da água e dos sólidos dissolvidos são escassos (CLOTHIER e SAUER, 1988). Sabe-se que na irrigação por gotejamento a distribuição da água concentra-se ao redor do gotejador, resultando em acúmulo de sais na extremidade do bulbo molhado (região úmida próxima à zona radicular do solo). (GARNIER et al., 1986, HAMZA; ALYMORE, 1992; GREEM e 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 pela plantas são fundamentais para a otimização da fertirrigação (HAGIN e 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 da 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 (SOUSA e COELHO, 2001).

Segundo Spalding et al. (1982) a aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes nitrogenados tem sido frequentemente sugerida como a principal fonte de contaminação de águas subterrâneas. Para prevenir e minimizar a poluição de água subterrânea com nitrato é

necessário um controle das taxas de nitrogênio aplicadas anualmente no solo, além dos fatores intervenientes na mobilidade do ânion no solo. Exner et al. (1991) verificaram 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.

Conforme Favaro (2005) os métodos mais indicados e precisos para o monitoramento do nitrato no solo são a utilização de nitrogênio (N) marcado e avaliação em lisímetros de drenagem, entretanto a técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) apresenta potencial para este monitoramento.

Para medidas precisas de umidade do solo e condutividade elétrica em laboratório e campo existe uma tendência de utilização da técnica TDR, onde se recomenda o levantamento de uma curva de calibração para cada tipo de solo, um inconveniente normalmente aceitável comparado com as vantagens que apresenta em relação às outras técnicas.

As vantagens inerentes da técnica 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 a outros métodos (TOPP et al.1980; COELHO e OR,1995).

1.1 OBJETIVOS

1.1.2 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo estudar a formação do bulbo molhado, avaliando-se os efeitos da relação água-solo-soluto que possam afetar a distribuição da solução no solo, afim de promover uma irrigação racional considerando as questões de sustentabilidade ambiental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação por gotejamento

A irrigação localizada consiste na aplicação da água em apenas uma parte do sistema radicular, através do uso de emissores pontuais, lineares ou superficiais. Dentre os sistemas de irrigação localizada, enfatizamos o sistema de gotejamento como sendo uma ótima escolha quando se trata de eficiência na aplicação da água e os nutrientes nela contidos.

Segundo Azevedo (1986), Dasberg e Bresler (1985) e Dasberg e Or (1999), entende-se irrigação por gotejamento de pequenas quantidades de água incidindo diretamente na área de abrangência do sistema radicular das plantas, através de gotejadores que podem ser pontuais ou estar distribuídos em linha, enterrados ou expostos no solo, contendo pressões de operação variantes entre 20-200 KPa e vazões entre 1-30 L.h⁻¹, tendo como resultado um delimitado volume de solo umedecido, distribuindo a água de forma a produzir um bulbo molhado (SOUZA e MATSURA, 2004).

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 irrigação subsuperficial.

A irrigação por gotejamento se mostra como uma alternativa vantajosa devido a sua eficiência que resulta em economia de água e energia, pois a água é aplicada onde a planta realmente necessita, obtendo-se uma redução nas perdas e alcance igual ou superior a 90% em sua aplicação. Segundo Wu e Gitlin (1975) a eficiência na aplicação de 90% pode ser facilmente obtida com o sistema de irrigação por gotejamento, em comparação com outras técnicas, tais como, aspersão (60-80 %) e superficial (50-60 %), sendo que o coeficiente de

variação de gotejadores com tecnologia atual gira em torno de 5%, o que resulta em uma eficiência de 96% ou mais (SOUZA e MATSURA, 2004).

O sistema de irrigação por gotejamento constitui-se numa das melhores alternativas para superar a ocorrência de significativa variabilidade espacial de características físicas, químicas e morfológicas dos solos na área irrigada. Através de modificações operacionais, ou mesmo dimensionais este sistema pode atender a eventuais variações de características de retenção e movimentação de água na área irrigada o que certamente, seria mais difícil de conseguir nos sistemas de superfície, ou em alguns equipamentos mecanizados por aspersão, como o pivô-central, o deslocamento linear e o autopropelido (SCALOPPI, 1986).

O sistema de irrigação por gotejamento é composto de linhas laterais, linhas secundárias, linha principal e cabeçal de controle. As linhas laterais são de polietileno, flexível e preto para evitar o desenvolvimento de algas. Nessa linha estão inseridos os gotejadores, que aplicam a água à cultura. As linhas secundárias levam a água da linha principal às linhas laterais, normalmente são enterradas, podendo ser de PVC ou metal. O cabeçal de controle é composto de moto bomba, filtro de areia, filtro de tela, misturador de adubos, válvula e registro. A função do cabeçal é fornecer água limpa e 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 (VIEIRA, 1975; KELLER e BLIESNER, 1990).

2.2 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 (REICHARDT, 1990). Sua propagação, proveniente de uma fonte pontual de água no solo, é tridimensional e a forma de volume do 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.

Na irrigação por gotejamento, recomenda-se que a porcentagem de área molhada seja obtida com base em bulbos molhados produzidos em condições de campo, com aplicação de água pelos gotejadores do sistema de irrigação. Entretanto, muitos sistemas são dimensionados utilizando-se dados tabelados pela inexistência de informações de campo para a maioria dos solos (NASCIMENTO e SOARES, 1988). Segundo Keller e Bliesner (1990) considerar-se uma porcentagem inferior a 67% para regiões áridas e superior a 33% para regiões de irrigação complementar.

Tem-se tentado determinar a forma do bulbo molhado em função das propriedades físicas do solo. Os métodos são complexos e o resultado pouco confiável, dada à heterogeneidade dos solos, mas 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 de água inicial do solo. A extensão horizontal do bulbo H está diretamente relacionada com a força capilar e com a raiz quadrada do tempo de aplicação, exceto se houver algum obstáculo ao movimento de água. A extensão vertical V está diretamente relacionada com a extensão horizontal do bulbo e o produto de H por V é proporcional ao volume de água aplicado. Apesar dessas regras gerais é difícil prever qual pode ser o padrão de distribuição da água em um dado solo. Portanto é aconselhável realizar

ensaios de campo ou usar métodos empíricos até que sejam disponíveis métodos de cálculos mais confiáveis (SALLES, 1990).

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 este 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.

Segundo Nascimento e Soares (1988), na irrigação por gotejamento, recomenda-se que o volume de solo molhado seja obtido 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.

Aplicações excessivas de fertilizantes, utilização de água salina e o formato do bulbo molhado na irrigação por gotejamento, fazem com que haja acúmulo de sais na superfície do solo e na periferia do bulbo. Em cultivo protegido, com características mais intensivas de utilização do solo, a aplicação de fertilizantes e o manejo do solo e da irrigação devem ser realizados de forma adequada a fim de evitar o acúmulo excessivo e prejudicial de sais (CARRIJO et al., 1999).

2.3 Dinâmica do soluto no bulbo molhado

Apesar do uso difundido da fertirrigação via irrigação por gotejamento, informações sobre o movimento simultâneo da água e dos sólidos dissolvidos são escassos (CLOTHIER; SAUER, 1988).

Sabe-se que em irrigação por gotejamento a distribuição de água concentra-se ao redor do gotejador, resultando em acúmulo de sais nas extremidades do bulbo molhado. Este fenômeno conduz, frequentemente, a salinização dentro da área irrigada e, usualmente são requeridas irrigações suplementares para percolar o excesso de sais, principalmente se a água de irrigação contiver quantidades consideráveis de sais. Plantas tolerantes e resistentes à salinização adicionadas ao manejo adequado da fertirrigação podem modificar este cenário (GARNIER et al., 1986; HAMZA e ALYMORE, 1992; GREEM e CLOTHIER, 1995).

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 (SOUSA; COELHO, 2001).

A maioria das plantas necessita 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. 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 forma lixiviados para baixo da zona radicular da cultura.

O nitrogênio pode ser introduzido ao solo em diferentes combinações químicas, as quais possuem diferentes padrões de solubilidade e mobilidade, sendo que em forma de uréia e nitratos, essa mobilidade é maior, enquanto que o movimento do amônio é menor devido à adsorção no complexo de troca do solo (VILLAS BOAS, VITTI; BOARETTO, 1994).

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 et al. (1991) afirmam que, mesmo quando esses valores estão acima de 10 mg.L⁻¹, já provocam problemas de saúde em crianças, como a metemoglobinemia, conhecida como doença do bebê azul, desta forma, é importante que se disponha de informações a respeito de fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante a lixiviação, trocas iônicas e adsorção desses íons favorecendo a compreensão de como ocorre a sua movimentação no solo, com o objetivo de evitar a contaminação de águas subterrâneas e a necessidade de se manter um controle sobre a aplicação dessa substância na prática da irrigação.

A TDR tem sido usada para avaliação do movimento de solutos no solo (WARD et al., 1995; NADLER et al., 1999; BEJAT et al., 2000; MMOLAWA e OR, 2000). Tal aplicação pode trazer benefícios para a pesquisa em fertirrigação, de forma a dar subsídios ao entendimento da dinâmica de solutos sob diferentes manejos da água de irrigação (MARTINS, 2007).

2.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) é a habilidade inerente de um meio em conduzir uma corrente elétrica, estando correlacionada à concentração total de eletrólitos dissolvidos (íons)

em solução, uma vez que somente a água por si só não se apresenta como boa condutora de corrente elétrica, e o uso da água é comum para expressar a concentração total de sais dissolvidos numa amostra aquosa (QUEIROZ, 2004). A condutividade elétrica (CE) é um critério muito utilizado para medir o nível de salinidade do solo ou da água de irrigação, sendo expressa em deciSiemens por metro (dS.m^{-1}), miliOhms por centímetro (mmOmhs.cm^{-1}), microSiemens por centímetro ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) ou Siemens por metro (S.m^{-1}).

O conhecimento da condutividade elétrica e da composição química da solução do solo é importante para determinar a salinidade e a presença de íons tóxicos, durante o ciclo de uma cultura. Segundo Blanco et al. (2000) os métodos mais usados para determinar a salinidade do solo são: as soluções diluídas (solo, água) e extrato de saturação. Entretanto, entre os vários métodos propostos para medidas de salinidade do solo, somente métodos elétricos baseados na condutividade elétrica do volume do solo parecem práticos (MALICKI e WALCZAK, 1999). A concentração de sais solúveis do extrato de saturação tende a ser aproximadamente igual à metade da concentração da solução do solo no seu limite máximo de retenção de umidade na capacidade de campo e aproximadamente igual à quarta da concentração no limite inferior de umidade (QUEIROZ, 2004).

Além dos métodos laboratoriais, métodos de campo estão sendo utilizados para determinar a salinidade do solo, pois demandam menos tempo, permitindo maior número de determinações. Em condições de campo, destacam-se os equipamentos munidos de sensores que são capazes de medir a condutividade elétrica total do solo, dentre eles se sobressai o TDR (Time Domain Reflectometry), por permitir grande número de leituras simultâneas utilizando sondas e fácil operação (MALICKI e WALCZAK, 1999; MOJID e MALICKI, 1999).

2.5 Contaminação das águas por nitrato

Das diversas formas de nitrogênio presentes na natureza, à amônia (NH_3) e, em especial, o nitrato (NO_3^-) podem ser causas da perda da qualidade da água.

Embora a amônia, quando presente na água em altas concentrações, possa ser letal aos peixes pela toxicidade que representa para este grupo da fauna, a amônia originada no solo ou aplicada via fertilizantes tende a ser rapidamente convertida em amônio (NH_4^+) e esse, por sua vez, é convertido em nitrato pelo processo microbiano da nitrificação.

Portanto, o nitrato é a principal forma de nitrogênio associada à contaminação da água pelas atividades agropecuárias. Isso ocorre pelo fato de que o ânion nitrato, caracterizado por ser fracamente retido nas cargas positivas dos colóides, tende a permanecer mais em solução, principalmente, nas camadas superficiais do solo, nas quais a matéria orgânica acentua o caráter eletronegativo da fase sólida (repelindo o nitrato), e os fosfatos aplicados na adubação ocupam as cargas positivas disponíveis. Na solução do solo, o nitrato fica muito propenso ao processo de lixiviação e ao longo do tempo pode haver considerável incremento nos teores de nitrato nas águas profundas.

A intensidade do processo de contaminação depende principalmente das quantidades de nitrato presentes ou adicionadas ao solo, da permeabilidade do solo, das condições climáticas (pluviosidade) e de manejo da irrigação e da profundidade do lençol freático ou aquífero (BHUMBLA, 2001).

Merece destaque o fato de que a elevação dos teores de nitrato na água é indicativo de risco potencial para a presença de outras substâncias indesejáveis, tais como muitas moléculas sintéticas de defensivos agrícolas que possivelmente comportam-se de forma análoga ao nitrato (NUGENT et al., 2001).

Á exceção da erosão que carrea fertilizantes e resíduos orgânicos para os cursos d'água, a mobilização excessiva do nitrato para os mananciais decorre normalmente de um desbalanço entre as taxas de suprimento de nitrogênio mineral (nitrato ou amônio) no solo e a capacidade da cultura de absorver e assimilar o nutriente, convertendo-o em formas orgânicas. Assim, quando no solo há nitrato em quantidade acima da que determinada cultura pode aproveitar, a chance de lixiviação do íon para camadas profundas não exploradas pelo sistema radicular é maior, gerando desperdício do nutriente e impactos ambientais.

Áreas de agricultura intensiva com alta produtividade recebem aplicações de produtos nitrogenados em quantidades e frequência muitas vezes excessivas. Os fertilizantes nitrogenados minerais e os esterco manejados inadequadamente são apontados como as maiores fontes de contaminação difusa da água por nitrato em áreas agrícolas. A grande dificuldade está em se dimensionar corretamente a adubação, considerando a reserva do solo, a exigência das culturas, as condições climáticas e edáficas, a taxa de liberação de nitrogênio pelos diferentes fertilizantes, bem como o monitoramento do nitrato no solo, ou seja no sistema radicular das culturas (EMBRAPA, 2002).

2.6 Uso da técnica da TDR

Vários métodos são utilizados para 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 a termalização de nêutrons, resistência elétrica e reflectometria no domínio do tempo – TDR (SOUZA; MATSURA, 2002)

A técnica da TDR, como método de medida de umidade e condutividade elétrica do solo, vem se destacando no cenário das técnicas empregadas para medidas de parâmetros

físicos do solo. No final da década de 60, Fellner-Feldegg, (1969) introduziram a técnica TDR como uma técnica para medir a permissividade dielétrica complexa de líquidos. A partir de então, a técnica da TDR tem sido aplicada nas medidas de propriedades dielétricas de muitos materiais, inclusive o solo.

Muitas pesquisas foram efetuadas para se avaliar o comportamento da constante dielétrica em função das características do solo. Davis e Annan (1997) entre outros, estudaram os efeitos dos componentes do solo sobre as frequências das ondas eletromagnéticas, demonstraram que a parte real da constante dielétrica do solo (k) mostrava forte dependência do conteúdo de água do solo e fraca dependência da composição e da densidade do solo.

No Brasil, os primeiros trabalhos com TDR foram realizados por Herrmann (1993), que desenvolveu um equipamento de transmissão de microondas para a determinação da umidade do solo e Tommaselli (1997) que realizou estudos de calibração da técnica de TDR para 5 tipos de solo.

A TDR baseia-se no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em cabos condutores envoltos pelo solo. Esse fenômeno se deve a diferença entre as constantes dielétricas, (K , adimensional), da água, do ar e do solo. Na matriz do solo as constantes variam entre 1 e 81. O ar possui o valor mínimo igual a 1, as partículas sólidas variando entre 3 e 5, e água o valor máximo 81 (NOBORIO, 2001). A constante K medida nesse sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente (K_a , adimensional), assim conhecendo-se esta variável pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (CONCIANI et al., 1997). Para a medição são necessários, basicamente, um testador de cabo e um sensor com hastes metálicas (sondas) ligadas entre si por um cabo coaxial.

Segundo Conciani et al. (1996), o cálculo da constante dielétrica é feito empregando-se a equação que relaciona a constante dielétrica com o tempo que o sinal leva para percorrer o meio, em função do comprimento da sonda, isto é, com a distância percorrida pelo sinal, como se pode observar na equação abaixo. O fator 2L presente na fórmula leva em conta que o sinal faz o caminho de ida e volta, portanto, duas vezes o comprimento da haste:

$$Ka = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

onde,

Ka = Constante dielétrica

c = Velocidade da luz (0,30 m.ns⁻¹);

t = Tempo gasto para o sinal percorrer a sonda (ns);

L = Comprimento da haste (m).

Além da estimativa da umidade a técnica de TDR permite a determinação da condutividade elétrica dos solos, sendo descrito pioneiramente por Topp et al. (1980) e sistematizado por Nadler et al. (1991), Dalton et al. (1984), Dalton (1992) e Heimovaara (1993). Tradicionalmente, a condutividade elétrica da solução no solo (CEs, dS.m⁻¹) é medida por um condutímetro com uma amostra de solo deformado misturado com certa quantidade padrão de água, extraindo-se a solução desta amostra por filtragem ou centrifugação (EMBRAPA, 1997). A TDR, entretanto, mede a condutividade elétrica aparente (CE_{TDR}, dS.m⁻¹), o qual varia com a umidade do solo. No entanto, existem formas de se correlacionar indiretamente a CEs com a CE_{TDR}, como os modelos de correlação pelo fator geométrico de

tortuosidade da transmissão das ondas eletromagnéticas na sonda da TDR, propostos por Rhoades et al. (1976), Rhoades et al. (1989), Mualen e Friedman (1991) e Heimovaara et al. (1995) e Martins et al. (2007).

A CE_{TDR} é estimada pela relação de amplitude dos sinais da TDR ao longo da sonda inserida no solo (GIESE e TIEMANN, 1975).

$$CE_{TDR} = \frac{Z_0}{120\pi LZ_U} \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (2)$$

onde,

CE_{TDR} = Condutividade elétrica TDR (aparente)

Z_0 = Impedância característica da sonda;

Z_u = Impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 = Amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_{inf} = Amplitude do sinal de retorno depois de reflexões múltiplas.

A impedância característica (Z_0, Ω) é o modo de expressar a lei que relaciona a variação de voltagem e corrente com distancia ao longo de uma linha de transmissão uniforme, sendo geralmente utilizada para avaliar a performance de sondas de TDR. Em geral, sondas com Z_0 superior a 200Ω são inadequadas para a determinação da umidade do solo, pois neste caso a reflexão prejudica a interpretação do sinal eletromagnético inviabilizando a técnica. Segundo Zegelin et al. (1989) e Heimovaara (1993), pode-se medir Z_0 por determinação do coeficiente de reflexão da sonda (p), isso quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme (MARTINS, 2007).

$$Z_0 = Z_u * K^{0,5} * \frac{(1+p)}{(1-p)} \quad (3)$$

$$p = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1 \quad (4)$$

sendo,

V_1 = Amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda;

K = Constante dielétrica. Geralmente, o material dielétrico usado é água destilada a 20° C ($K = 81$).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em um ambiente protegido (casa de vegetação) de 140 m² numa área experimental do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, localizada no município de Taubaté, Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas latitude 23° 01' 55,25"; Sul e longitude 43° 30'39,74"; Oeste e elevação de 571 m.



Figura 1 – Casa de vegetação (estufa agrícola)

O tipo de solo da área é classificado como Latossolo Vermelho - Amarelo segundo a classificação brasileira de solos (EMBRAPA, 1999) com textura média do tipo areno-argiloso. Para determinação das características físico-hídricas e químicas do solo (Tabela 1) foram utilizadas amostras nas profundidades de 0-0,60 m, coletadas no local do experimento.

Tabela 1 - Características físico-hídricas e químicas do solo na camada de 0-0,60 m

Físico-hídricas										
Profundidade	CC	PMP	p	Ds	Dp	VIB	Areia	Silte	Argila	
		(m ³ /m ³)		(g/cm ³)		(mm/h)	(%)			
00 - 20	0,34	0,21	0,51	1,30	2,70	13,20	59	13	28	
20 - 40	0,33	0,21	0,50	1,35	2,70	9,40	57	13	30	
40 - 60	0,32	0,20	0,49	1,39	2,70	9,50	58	13	29	
Químicas										
Profundidade	pH	P	MO	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
	CaCl ₂	Mg/dm ³	(%)	Mmol/dm ³						
00 - 20	5,00	12	7	23	1,40	23	12	36,40	59,40	61
20 - 40	4,30	2	6	34	0,70	7	4	11,70	45,70	26
40 - 60	4,50	3	5	22	1,30	10	7	18,30	40,30	45

CC = Capacidade de Campo PMP = Ponto de Murcha Permanente p = Porosidade Ds = Densidade de solo Dp = Densidade de Partícula VIB = Velocidade de Infiltração Básica pH = Potencial de Hidrogênio P = Fósforo MO = Matéria Orgânica H+ Al = Acidez Potencial K = Potássio Ca = Cálcio Mg = Magnésio SB = Soma de Bases CTC = Capacidade de Troca Catiônica V = Saturação de Bases

3.1 Confeção das sondas de TDR

As sondas utilizadas no experimento foram construídas no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Taubaté – UNITAU, de acordo com o procedimento descrito por Souza et al. (2006). Sendo três hastes paralelas contínuas de aço inoxidável (AISI 304: diâmetro de 3 mm). As hastes foram cortadas com 220 mm de comprimento. Um cabo coaxial (RG – 58; 50 Ω; L = 5 m) com um conector BNC, já unido em sua extremidade, foi soldado nas três hastes, onde o condutor externo do cabo foi ligado nas duas hastes laterais e o interno na haste central. Para a soldagem utilizou-se uma estação de solda elétrica e uma liga de estanho. Para permitir a fixação do cabo coaxial nas hastes de aço inoxidável foi necessária a limpeza da superfície da haste com uma solução de ácido fosfórico a 1%.

A armação da sonda de TDR formada por hastes e cabo coaxial (Figura 2), foi colocada em um gabarito. Este gabarito foi confeccionado em molde de silicone, e colocado em um suporte de madeira (Figura 3A). A resina epóxi foi utilizada com o objetivo de formar um bloco resistente, promovendo sustentação da estrutura da sonda e marcando o seu início.

Após 5 horas da aplicação da resina as sondas adquiriram resistência suficiente e puderam ser retiradas do interior do gabarito. A retirada das sondas foi facilitada untando-se o interior do perfil do gabarito com vaselina sólida antes da aplicação da resina epóxi.

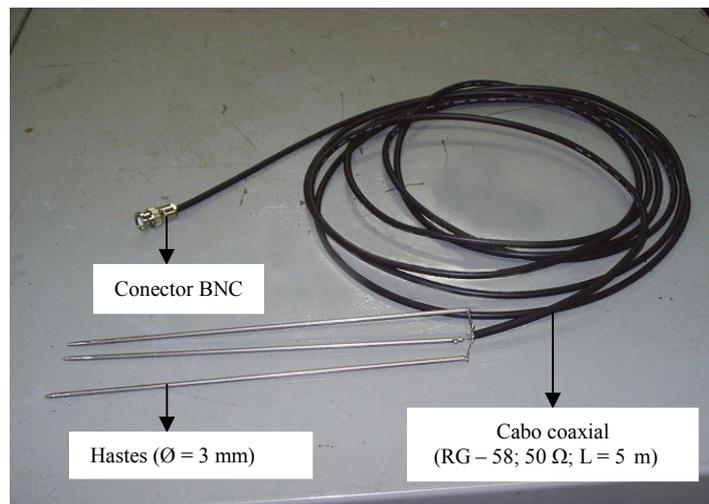


Figura 2 - Armação das sondas de TDR

As sondas confeccionadas, Figura 3B, se mostraram com característica adequada quanto a sua funcionalidade, pois puderam ser calibradas apresentando um erro médio de $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

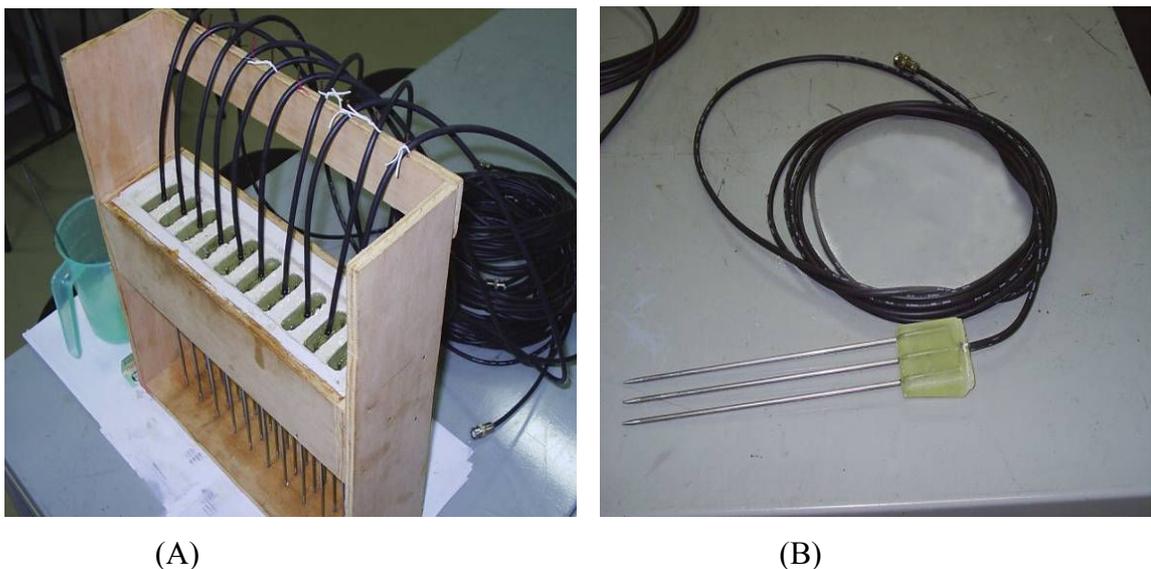


Figura 3A - Gabarito construído para aplicação da resina; B - Estrutura construtiva da sonda de TDR.

3.2 Instalação das sondas de TDR na trincheira

Para instalação das sondas de monitoramento abriu-se uma trincheira com dimensões de 1,20 m x 0,80 m (largura e profundidade) conforme Figura 4A, em um ambiente protegido (casa de vegetação) com dimensões de 7 x 20 m; seguindo-se a metodologia proposta por Coelho e Arruda (2001).

O posicionamento das sondas foi realizado da seguinte forma: usando uma trena, foram marcados pontos com distância de 0,1 m entre si, no sentido vertical. Nesses pontos foram colocadas as 6 primeiras sondas, formando a primeira coluna central tida como base para o alinhamento das outras sondas. Estas por sua vez, foram instaladas com o mesmo espaçamento de 0,1 m, porém no sentido horizontal, formando-se nove colunas e seis linhas, tendo as colunas das pontas apenas quatro linhas, totalizando-se 50 sondas. Esse procedimento foi repetido para as outras duas paredes da trincheira. Dessa forma, obteve-se uma malha vertical e horizontal na parede da trincheira, onde cada sonda representa uma área de $0,01 \text{ m}^2$, promovendo “medidas pontuais” em duas direções a partir do emissor localizado na área central da parede da trincheira. A Figura 4B mostra a distribuição final das sondas na trincheira, totalizando três paredes com 150 sondas, as quais foram utilizadas para os ensaios de 2, 4 e 8 L.h^{-1} .



Figura 4A - Trincheira aberta para a instalação das sondas de TDR 4B - Disposição final das sondas instaladas

A trincheira foi fechada com o mesmo solo retirado durante a sua abertura, conforme Figuras 5A e 5B. Porém, devido à diferença nas propriedades físicas do solo, e consequentemente, na distribuição de água, ocasionadas durante a movimentação do solo, as leituras só foram realizadas após período de reestruturação do solo de aproximadamente dois meses. Foram confeccionadas três trincheiras, totalizando três repetições para cada ensaio.



(A)

(B)

Figura 5A - Acomodação do solo na trincheira; Figura 5B - Trincheira fechada com o mesmo solo retirado.

3.3 Condução do ensaio

O monitoramento da dinâmica da solução no solo foi realizado através de 50 sondas de TDR em pequenos intervalos de tempo: antes da aplicação, após a infiltração e a cada $\frac{1}{2}$ hora após a infiltração.

Um Reflectômetro TDR100 (Campbell Scientific, Logan-Utah) equipado com uma interface RS 232, que analisa o sinal eletromagnético automaticamente por um coletor de dados (CR1000 – Datalogger – Campbell Scientific) foi utilizado para o monitoramento.

As leituras de umidade e condutividade elétrica em todas as posições foram realizadas de forma contínua acompanhando os ciclos de irrigação, isto é, envolvendo a fase de

infiltração e redistribuição. 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 frasco de Mariote foi utilizado para manter a pressão no gotejador constante (Figura 6), e a aplicação do nutriente (nitrato de potássio) ocorreu através da água de irrigação armazenada no frasco. Este procedimento descrito foi desenvolvido embasado nos trabalhos de Coelho e Or (1999) e Wiens et al. (2002).



Figura 6 – Sistema de frasco de Mariote utilizado no ensaio

O fertilizante utilizado no ensaio foi o nitrato de potássio (KNO₃), pois tanto o nitrogênio como o potássio apresentam grande mobilidade no solo, comportamento desejável em estudos de dinâmica de íons na solução do solo. Além disso, a concentração dos íons de nitrato pode ser facilmente estimada por medidores com eletrodos seletivos.

A concentração do nutriente adicionado ao frasco foi estimada pela condutividade elétrica igual a 2 dS m⁻¹ (14,5 mmol L⁻¹ KNO₃). Este valor de condutividade elétrica foi escolhido por apresentar riscos moderados de salinidade na água de irrigação. A calibração da

sonda de TDR para a quantificação do nutriente (concentração do nutriente na solução no solo) foi realizada seguindo o procedimento descrito por Mmolawa e Or (2000).

O monitoramento do ensaio foi facilitado devido à automação das sondas de TDR por um multiplexador (Figura 7), o qual possibilitou medições em pequenos intervalos de tempo.

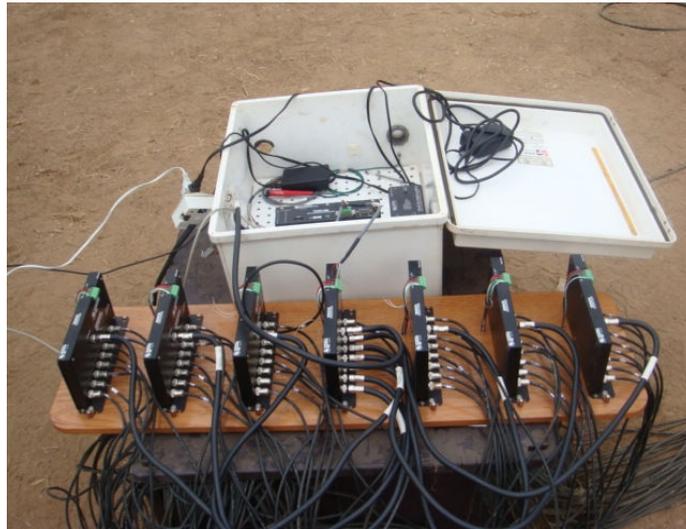


Figura 7 – Detalhe dos multiplexadores para automação das leituras

Foram medidos, também, o tamanho da poça saturada formada no momento da infiltração e o avanço da frente de umedecimento da superfície do solo, por meio de uma trena, conforme Figura 8. Desta forma pode-se avaliar a área superficial molhada em função do tempo e volume aplicado. A partir dos resultados de umidade e da concentração do nitrato na solução no solo, foram estimados os valores de armazenamento da solução no solo, permitindo calcular a eficiência da aplicação e da distribuição.

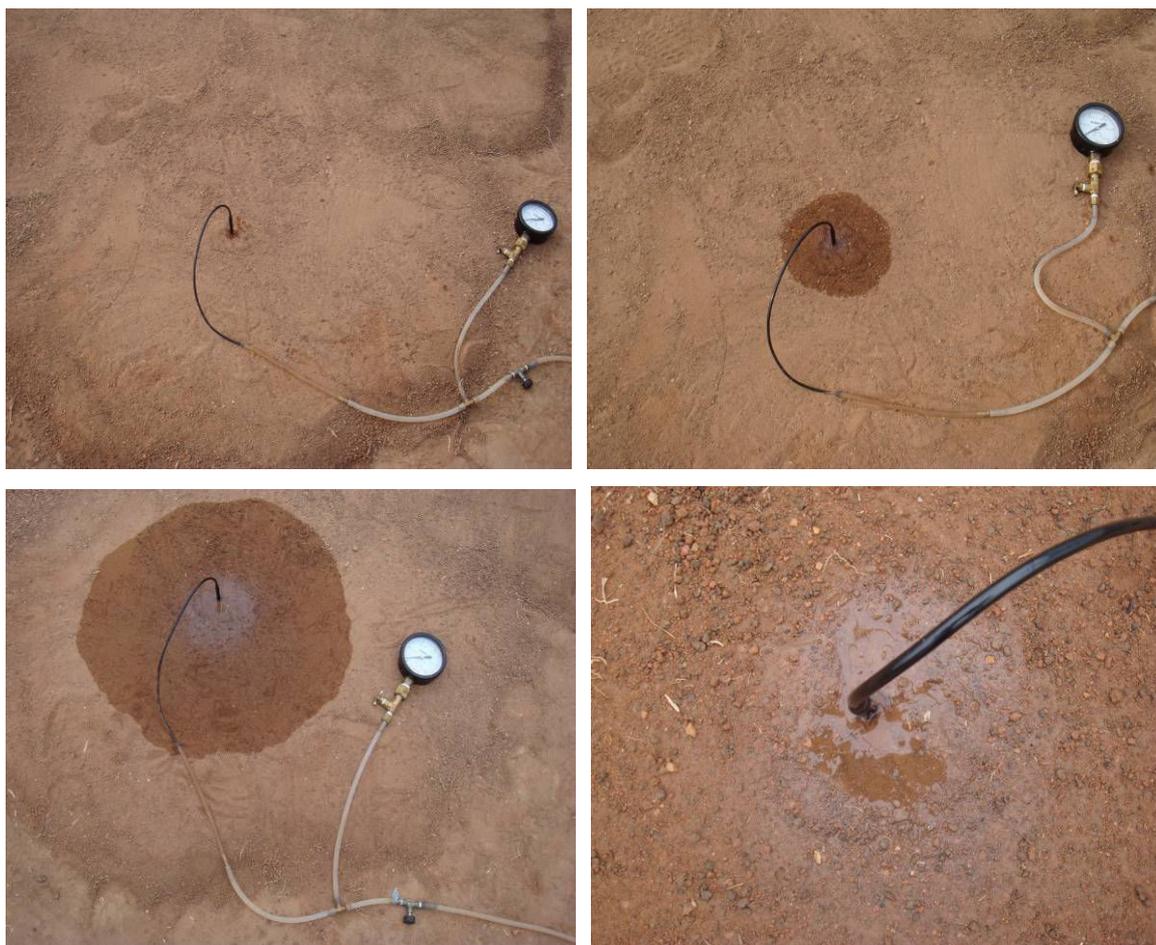


Figura 8 – Processo de formação do disco saturado e frente de umedecimento

Foi possível também a partir de uma única sonda pontual estimar a umidade e a concentração da solução no solo. Conseqüentemente, a distribuição e o armazenamento da solução no solo foram monitorados e contabilizados. Estas medições foram analisadas através do programa de mapeamento superficial em 3D, o qual apresentou o perfil de distribuição do nutriente em função da umidade e condutividade elétrica do solo, proporcionando informações básicas sobre a dinâmica da solução no solo.

Para verificar o uso da técnica da TDR na estimativa da distribuição espacial e temporal da solução, amostras de solo foram coletadas no final do ensaio para determinação da condutividade elétrica do solo pelo método padrão (extrato de saturação). Utilizando a

metodologia proposta por Richards (1954) a partir das pastas saturadas e sob vácuo, retirou-se o extrato de saturação e determinou-se a condutividade elétrica (Figura 9).



Figura 9 – Medidas de condutividade elétrica do extrato de saturação

O armazenamento da solução no solo foi contabilizado considerando-se que cada duas sondas de TDR, posicionadas simetricamente em direções opostas, representaram um anel concêntrico de solo. Desta maneira, a umidade volumétrica média de cada anel foi multiplicada pelo seu respectivo volume de solo, o que possibilitou obter os volumes de água parcial e total armazenados. Paralelamente, obteve-se a concentração da solução no solo em mmol.L^{-1} , também na forma parcial ou total dentro do bulbo molhado.

Complementando o procedimento descrito acima, assumiu-se um volume central dentro do bulbo molhado de $0,40 \times 0,40 \times 0,50 \text{ m}$, respectivamente, comprimento, largura e profundidade, no qual o gotejador foi posicionado no ponto central. Desta forma pode-se efetuar uma análise de uniformidade comparativa, com o propósito de entender as diferenças entre os valores de umidade e de concentrações individuais estimadas dentro do volume de controle.

Os resultados da distribuição e do armazenamento da solução no solo permitiram identificar informações referentes aos efeitos da relação água-solo-soluto para um dado volume radicular, que possam auxiliar no manejo e minimização de impactos decorrentes da fertirrigação via irrigação por gotejamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise dos dados experimentais

No processo de validação dos dados, obtidos durante os ensaios, verificou-se um coeficiente de correlação satisfatório ($R^2=0,90$) entre as leituras de condutividade elétrica obtidas com as duas técnicas em questão, condutividade elétrica do TDR (CE_{TDR} (dS.m⁻¹)) *versus* condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_S (dS m⁻¹)) e um coeficiente angular próximo de 1, conforme a Figura 10. Estes resultados demonstram existir uma associação linear entre as técnicas e indicam uma variação direta no valor de CE_S para uma unidade de CE_{TDR} , confirmando-se que suas características apresentam uma relação funcional na estimativa da condutividade elétrica do solo. Sendo assim, a técnica da TDR pode substituir a técnica da pasta saturada promovendo agilidade na estimativa, sendo que o tempo envolvido na estimativa da condutividade elétrica do solo através da TDR é bem inferior à determinação feita pelo método padrão (extrato de saturação). Propiciando contribuições ágeis e precisas de forma que as informações possam ser usadas para auxiliar nas decisões possíveis dentro das condições de incerteza.

Para relacionar CE_{TDR} com CE_S , utilizou-se a equação descrita por Souza et al. (2006) como segue:

$$CE_S = \frac{CE_{TDR} - 0,04}{(2,608 \theta - 0,165) \theta} \quad (5)$$

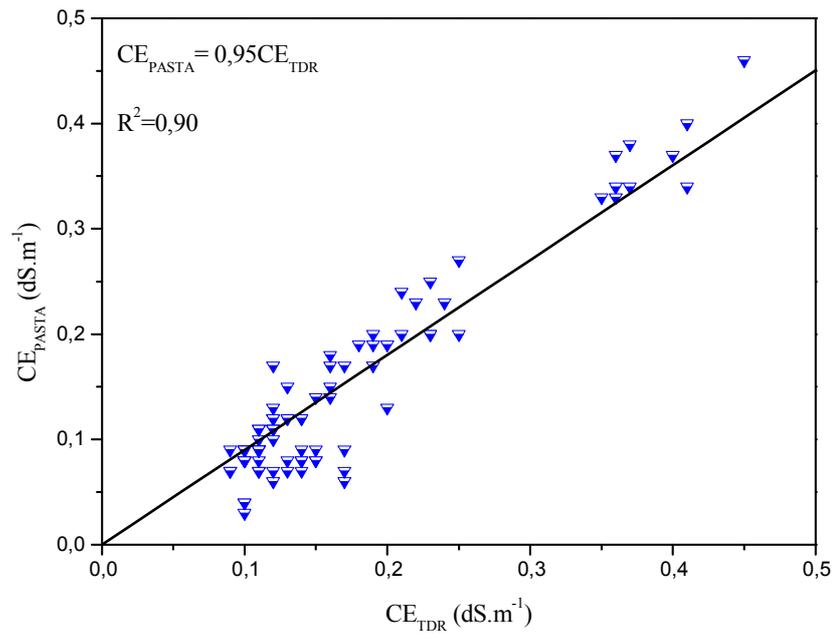


Figura 10 - Relação entre os valores de condutividade elétrica pela técnica da TDR (CE_{TDR}) e condutividade elétrica obtida pelo extrato de saturação (CE_s).

4.2 Disco saturado *versus* área superficial molhada

O tamanho do disco saturado (poça d'água, que permanece sobre o solo durante o processo de infiltração) formado no momento da aplicação de água e o avanço da frente de umedecimento na superfície do solo (Figura 11), foram acompanhados utilizando-se uma régua. Para medição dos diâmetros da frente de umedecimento utilizaram-se pontos de referência no sentido vertical e horizontal, obtendo-se valores nos dois sentidos. Na medição do disco saturado obteve-se uma média dos diâmetros no sentido vertical e horizontal.



Figura 11 - Processo de medição do disco saturado e frente de umedecimento
Fonte: Souza et al. (2006)

Os discos saturados alcançaram estabilidade após a 4ª aplicação de solução no solo nas vazões de 2 e 8 L.h⁻¹, conforme as Figuras 12 e 14, porém na vazão de 4 L.h⁻¹ houve um acréscimo contínuo desde a 1ª até a 10ª aplicação da solução no solo (Figura 13). Inicialmente, os raios dos discos saturados foram de 2,25 cm, 1,75 cm e 6,25 cm, atingindo os picos em 8,75 cm, 11,5 cm e 11,5 cm, respectivamente, para as vazões de 2, 4 e 8 L.h⁻¹. Analisando os dados verifica-se que inicialmente o raio do disco saturado da vazão de 8 L.h⁻¹ atingiu um valor maior que os raios das demais vazões, porém alcançou estabilidade com valor igual ao da vazão de 4 L.h⁻¹, demonstrando que dobrando-se o volume de solução aplicado no solo não houve mudança no raio final do disco saturado.

Nas estimativas dos raios da área superficial molhada no solo, verificou-se uma tendência de estabilização nas três vazões 2, 4 e 8 L.h⁻¹, após a 8ª aplicação. Os raios da frente de molhamento alcançaram inicialmente 14 cm, 16 cm e 14 cm; finalizando com picos de 34 cm, 35 cm e 34 cm, nas vazões de 2, 4 e 8 L.h⁻¹, respectivamente, após a infiltração da 1ª e da última aplicação da solução no solo.

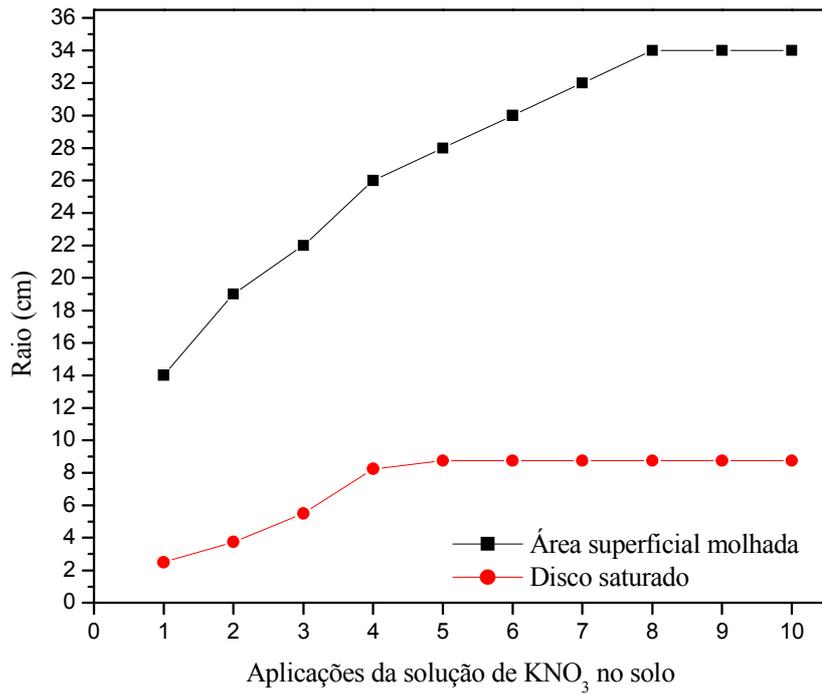


Figura 12 - Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observado para os ensaios após as aplicações de 2 L.h⁻¹.

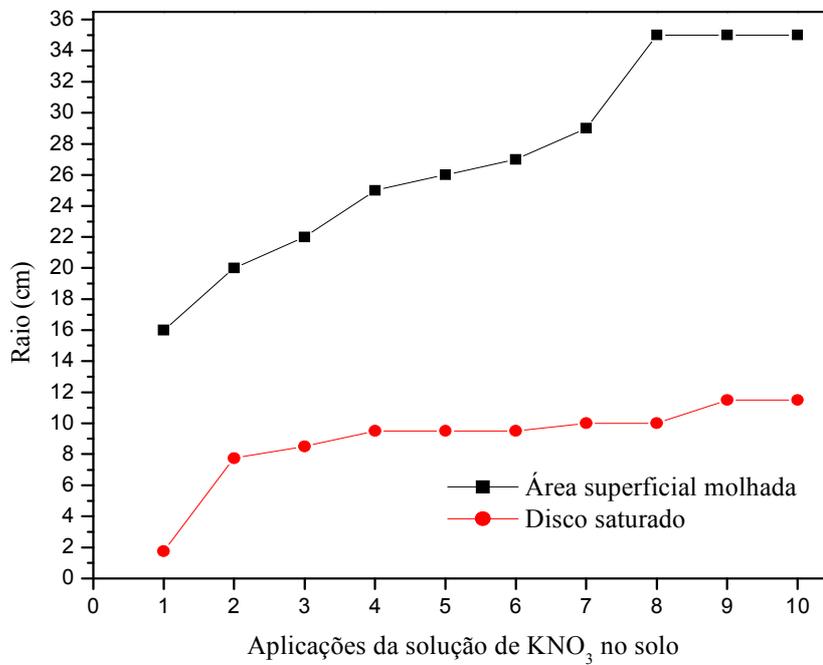


Figura 13 - Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observado para os ensaios após as aplicações de 4 L.h⁻¹.

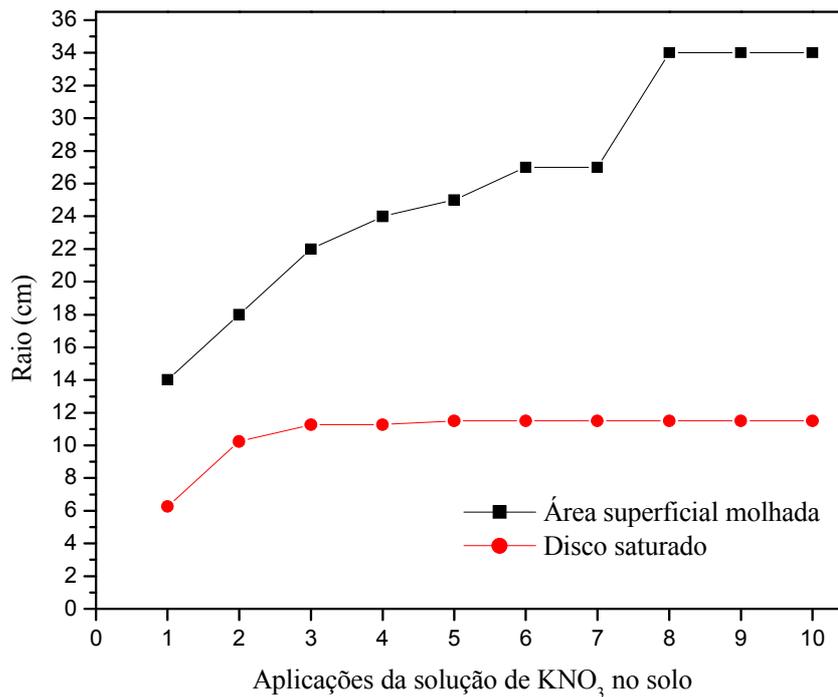


Figura 14 - Área superficial molhada dos bulbos e disco saturado observado para os ensaios após as aplicações de 8 L.h⁻¹.

Os resultados apresentados demonstram que a vazão dos gotejadores e as propriedades físicas do solo exercem efeito diferenciado na forma 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 aumento no raio horizontal, devido à alteração da área de infiltração da água aplicada. Estes resultados concordam com Bresler (1978), Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001) em ensaios de campo e Souza et al. (2004) em ensaios de laboratório, os quais relatam que a aplicação de solução contínua no solo via gotejamento promovem um incremento 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.

A discussão anterior demonstra que a percentagem de área molhada depende de fatores relacionados ao gotejador espaçamento e taxa de descarga para o solo e propriedades hidráulicas. No entanto, esta informação é insuficiente para determinar uma área mínima

molhada para dimensionar um sistema de irrigação. Keller e Bliesner (1990) consideram uma percentagem inferior a 67% para regiões áridas e superior a 33% para regiões de irrigação. No nosso caso, o percentual observado (21, 25 e 17%), para 2, 4 e 8 L h⁻¹, respectivamente, não encontram-se dentro dessa recomendação (considerando o total da superfície do solo). Defendemos a redução da superfície molhada do solo através de diferentes combinações de espaçamento e gotejador, podendo oferecer uma vantagem na redução da perda por evaporação da água (plantas daninhas e concorrentes). Os resultados revelam uma forte correlação entre a superfície molhada do solo e do raio de saturação em estudo. Essa correlação será estudada em maior detalhe para obter informações sobre a formação da superfície molhada horizontal do solo baseado no volume aplicado em testes de campo.

4.3 Distribuição e armazenamento da água no solo

Por tratar-se a técnica da TDR de um método indireto para estimar a umidade volumétrica do solo (θ) utilizou-se uma equação de calibração para conversão da constante dielétrica aparente (K_a) em umidade volumétrica do solo; sendo assim utilizou-se a seguinte equação:

$$\theta = 9E-05K_a^3 - 0,038K_a^2 + 0,0577K_a - 0,0484 \quad (6)$$

proposta por Almeida et al. (2007) para o mesmo solo e local de estudo.

Nas Figuras a seguir 15, 16 e 17 foram analisados os perfis de umidade ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) do solo para diferentes vazões (2, 4 e 8 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$), observados durante 10 aplicações da solução de nitrato de potássio (KNO_3) no solo.

Conforme os resultados experimentais de umidade obtidos com as leituras do aparelho de TDR, observou-se nas primeiras aplicações que os teores de água no perfil do solo mostraram-se simétricos nos eixos vertical e horizontal. Sendo que com a continuidade das aplicações de solução no solo, teve-se um aumento gradativo dos teores de umidade enquanto a frente de umedecimento evoluía. Verificou-se também um maior armazenamento da solução próximo ao gotejador e, conseqüentemente, uma diminuição desta, à medida que se aproxima da frente de molhamento, resultados semelhantes foram encontrados por Favaro (2005) em ensaio de laboratório e Martins et al. (2007) em ensaios de campo com o mesmo tipo de solo.

Têm-se, na Figura 15, os perfis de umidade do solo para a vazão de 2 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$, em 10 aplicações da solução 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 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$) não foi ultrapassada a profundidade de 0,40 m.

A Figura 16 apresenta os perfis de umidade do solo para vazão de 4 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ que, se comparados à vazão de 2 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$, apresentam uma mobilidade vertical evoluindo em menor proporção, não ultrapassando a profundidade de 0,23 m após a 10ª aplicação. Porém, no sentido horizontal a frente de umedecimento evoluiu rapidamente, verifica-se que logo após a 4ª aplicação manteve-se no intervalo entre 0,25 m e 0,33 m, até a 10ª aplicação de solução.

Comparando os bulbos de umidade percebe-se que com a aplicação do dobro da vazão (de 2 para 4 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$) proporcionaram-se maiores dimensões do bulbo molhado na horizontal e diminuição no sentido vertical. Estes resultados corroboram com as observações feitas por Martins et al. (2007) para as mesmas vazões e tipo de solo e com resultados obtidos por Souza

e Matsura (2004) que em ensaios de laboratório em Latossolo Vermelho distroférico, os autores verificaram que aumentando-se a vazão do gotejador, observou-se um aumento no raio horizontal e, diminuindo a vazão, ocorre acréscimo no raio vertical do bulbo molhado, devido à alteração da área de infiltração da água aplicada. Esses mesmos autores relatam ainda, que esses resultados estão em concordância com experimentos realizados por Bresler et al. (1971), Bresler (1978), Schwartzman e Zur (1986) e Keller e Bliesner (1990) os quais concluem que um aumento na vazão do gotejador resulta em um acréscimo no movimento horizontal e uma expansão menor no movimento vertical da água no bulbo.

Nos perfis de umidade dos bulbos na vazão de 8 L.h^{-1} , conforme Figura 17, verificou-se semelhança quanto ao movimento da água nos diferentes 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} .

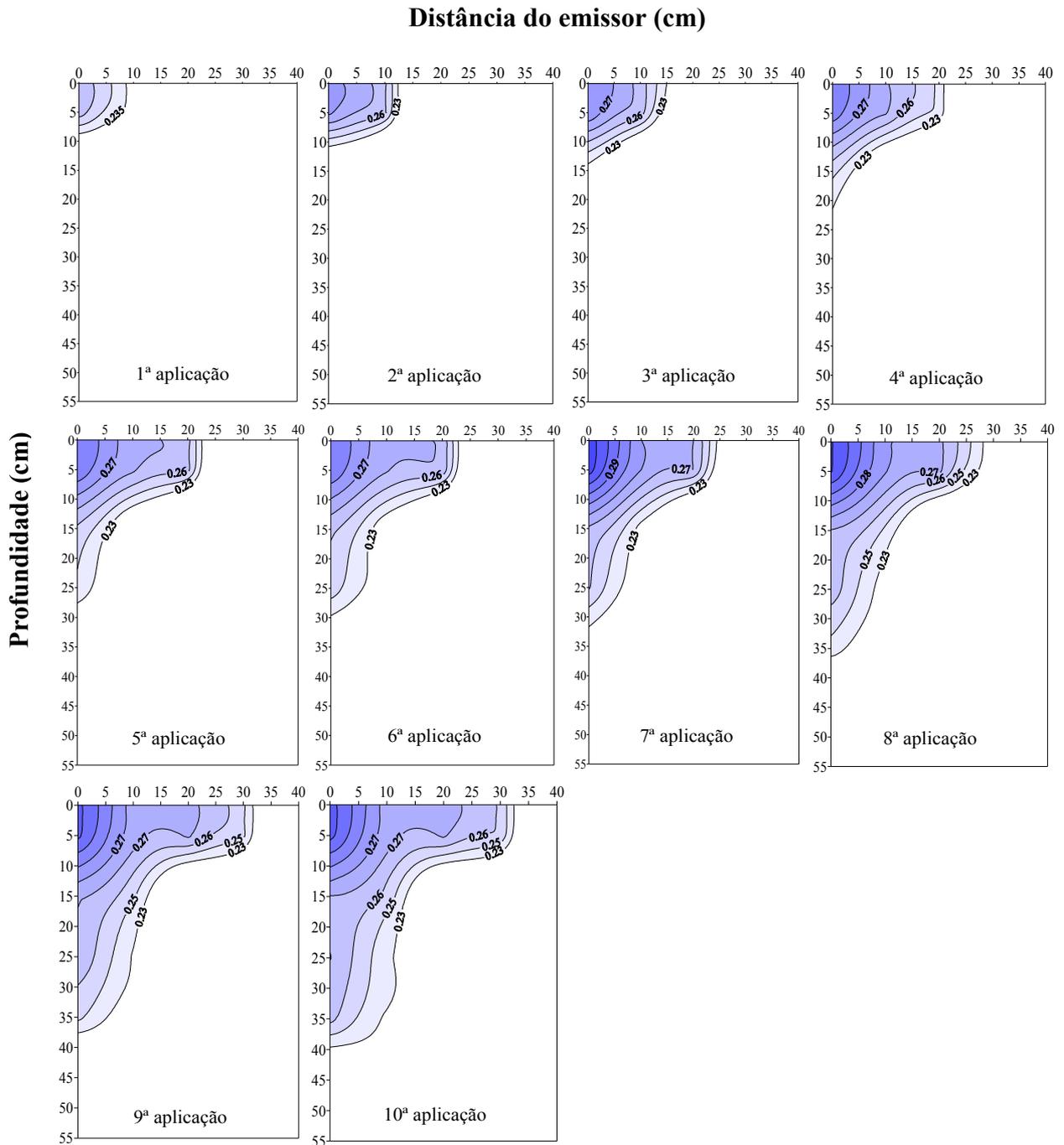


Figura 15 - Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de KNO_3 para vazão de $2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$

Distância do emissor (cm)

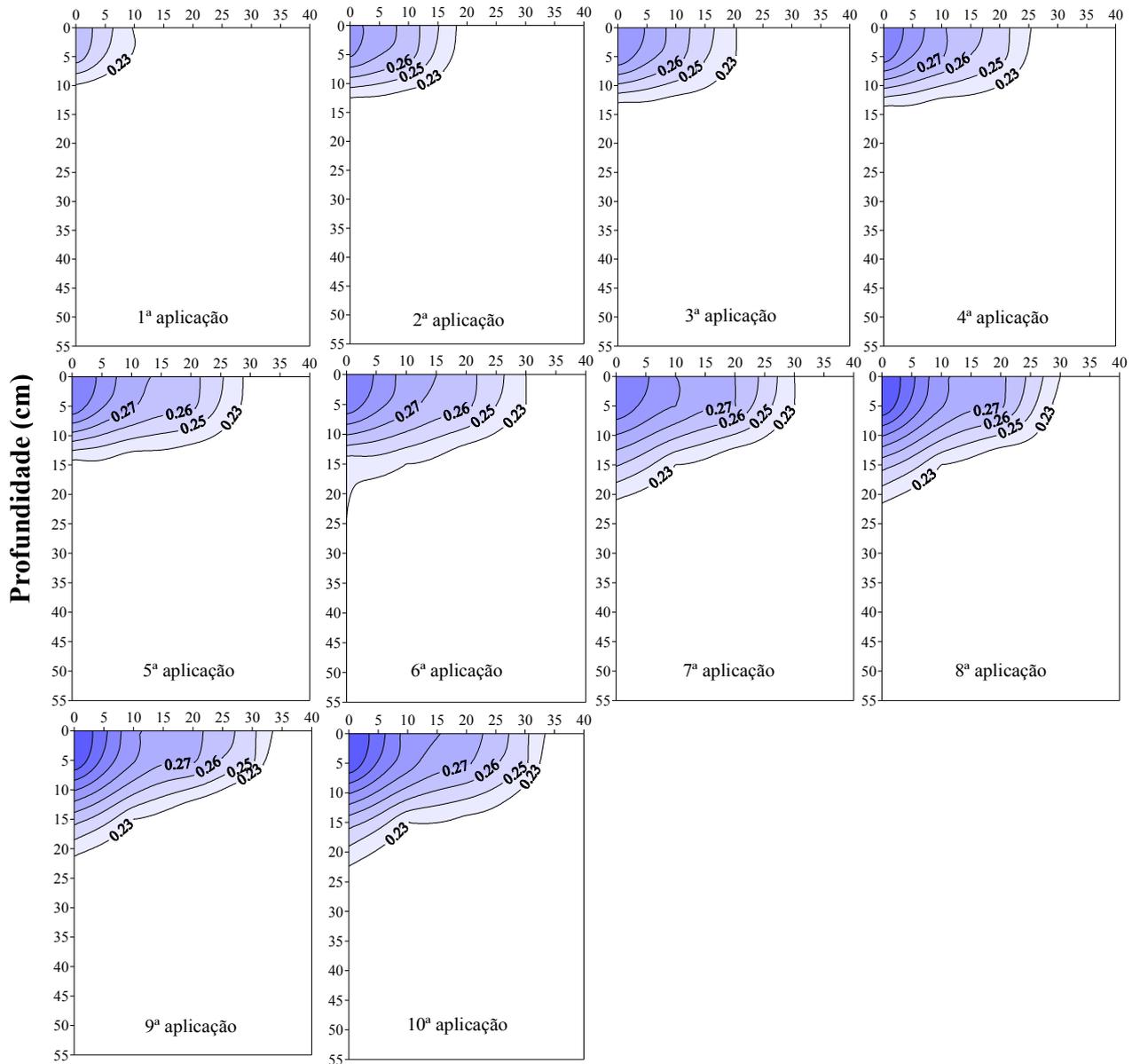


Figura 16 - Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de KNO_3 para vazão de $4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$

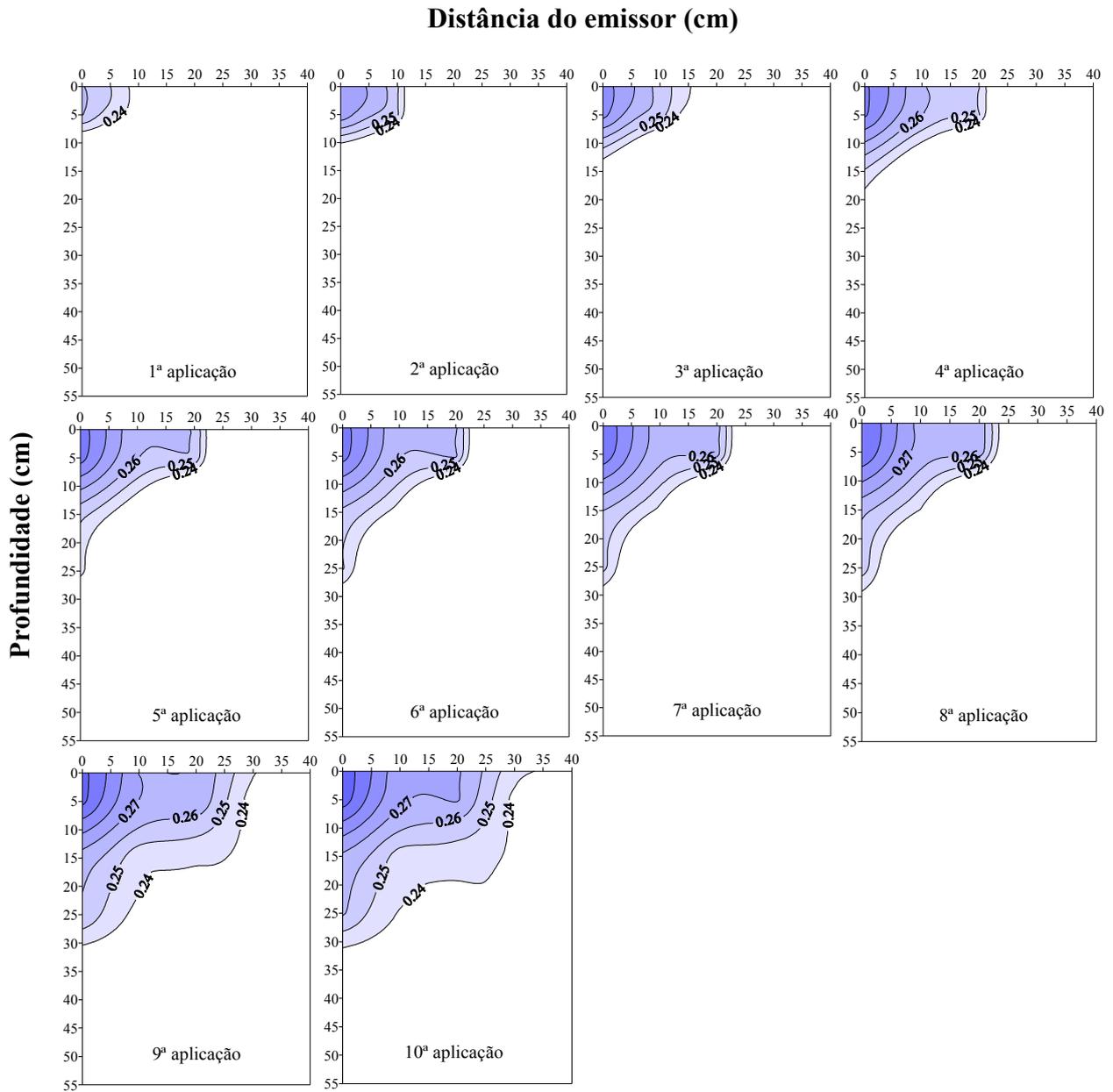


Figura 17 - Perfis de umidade do solo ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) ao final do processo de infiltração de cada aplicação de KNO_3 para vazão de $8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$

4.4 Distribuição da solução do solo (KNO_3)

A metodologia proposta por RHOADES et al. (1976) determina que a concentração da solução do solo deva ser estimada como função da umidade do solo. Neste mesmo ensaio foi possível comparar os perfis de condutividade elétrica (dS m^{-1}) nas estimativas feitas pela técnica de TDR após cada aplicação de nitrato de potássio (KNO_3) no solo, sendo 10 aplicações para as vazões de 2, 4 e 8 L.h^{-1} .

Os perfis de CE das Figuras 18, 19 e 20 apresentaram uma relação de formato e tamanho próximo dos perfis de umidade para as diferentes vazões. No entanto, a maioria dos perfis de CE manteve-se com tamanho um pouco inferior ou igual ao dos perfis de umidade do solo para as vazões de 2, 4 e 8 L.h^{-1} . 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 a frente dos sais, em direção ao extremo do bulbo. Conforme Valocchi (1984) e Blanco e Follegati (2001), 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 hipótese segundo Rivera (2004), esta baseada na CTC (capacidade de troca catiônica) do solo, 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.

Comparando os sistemas de menor vazão 2 L.h^{-1} , com os de maiores vazões 4 e 8 L.h^{-1} , nos perfis de CE, verifica-se que na menor vazão os sais são disponibilizados a uma distância (vertical) bem superior ao ponto de emissão, não sendo esta superioridade observada nos sistemas de vazões superiores. Levando-se em consideração o manejo da fertirrigação,

nota-se que no sistema de menor vazão 2 L.h^{-1} existe uma tendência de perda de nutrientes por lixiviação, dado este importante já que o consumo (aplicação) de nutrientes ao solo tem relação direta tanto no custo de produção, quanto ao impacto ambiental causado pela lixiviação dos sais para os corpos d'água.

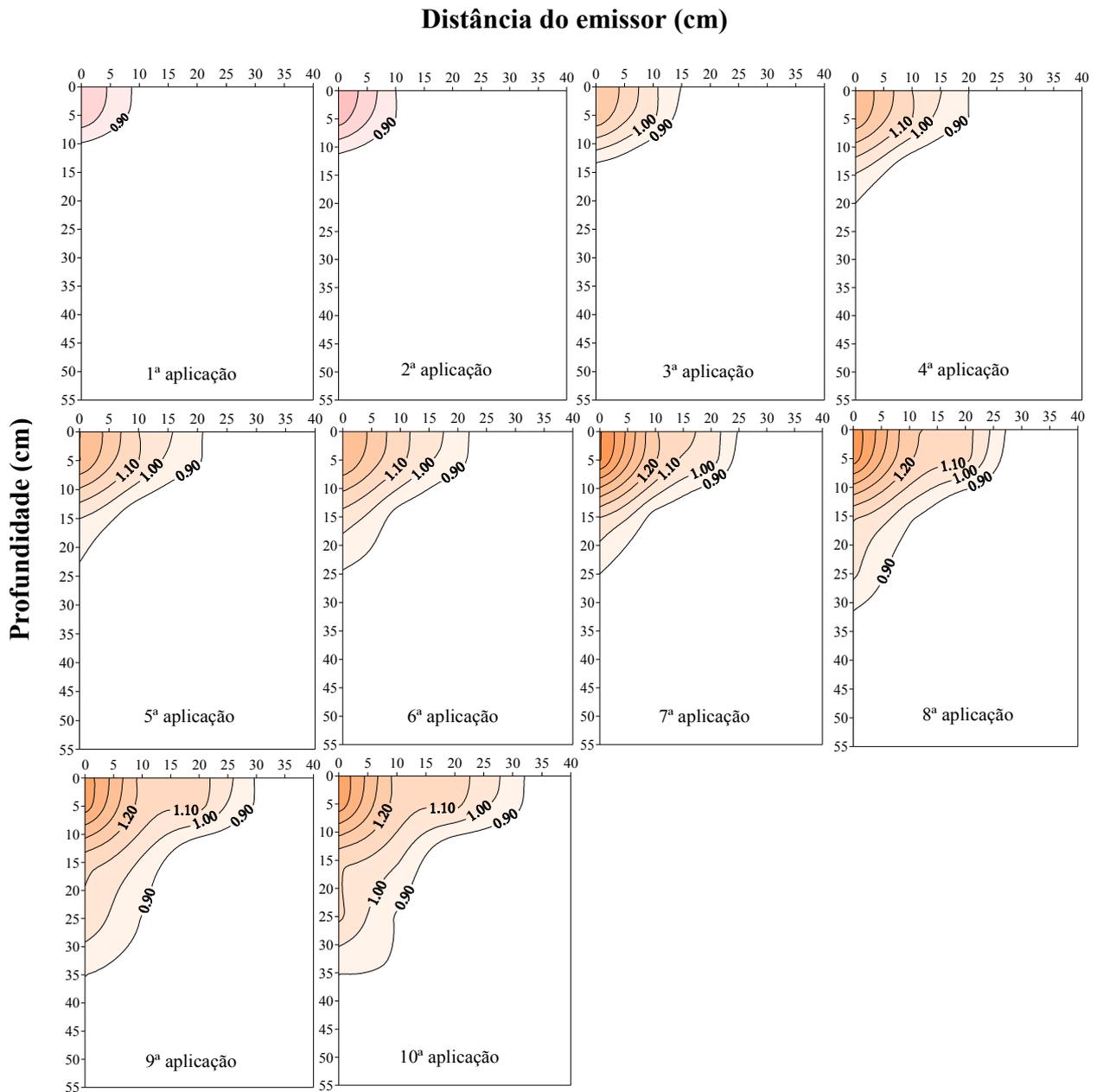


Figura 18 - Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m^{-1}) ao final do processo de infiltração de cada aplicação da solução de KNO_3 para vazão de 2 L.h^{-1}

Distância do emissor (cm)

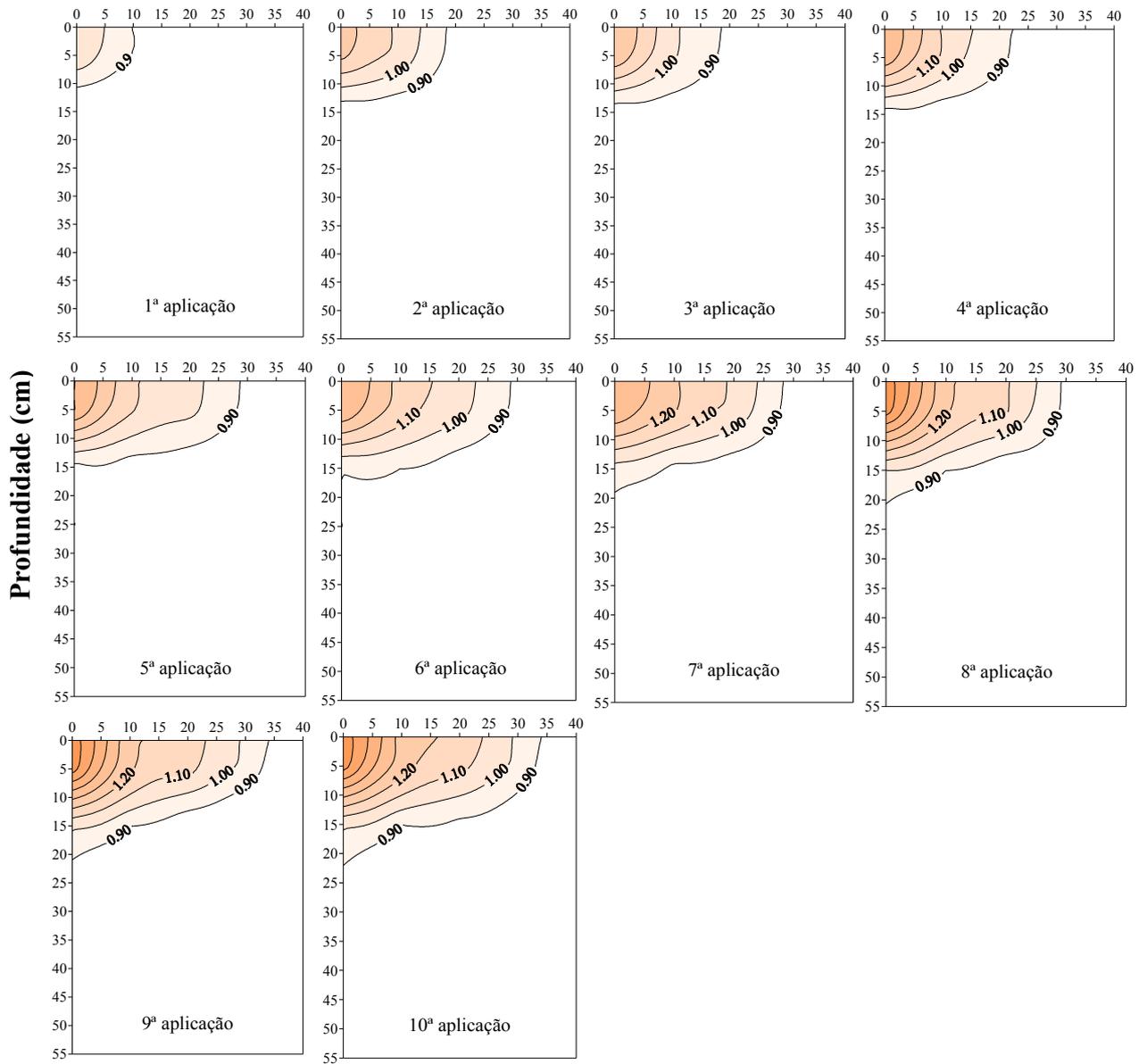


Figura 19 - Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m⁻¹) ao final do processo de infiltração de cada aplicação da solução de KNO₃ para vazão de 4 L.h⁻¹

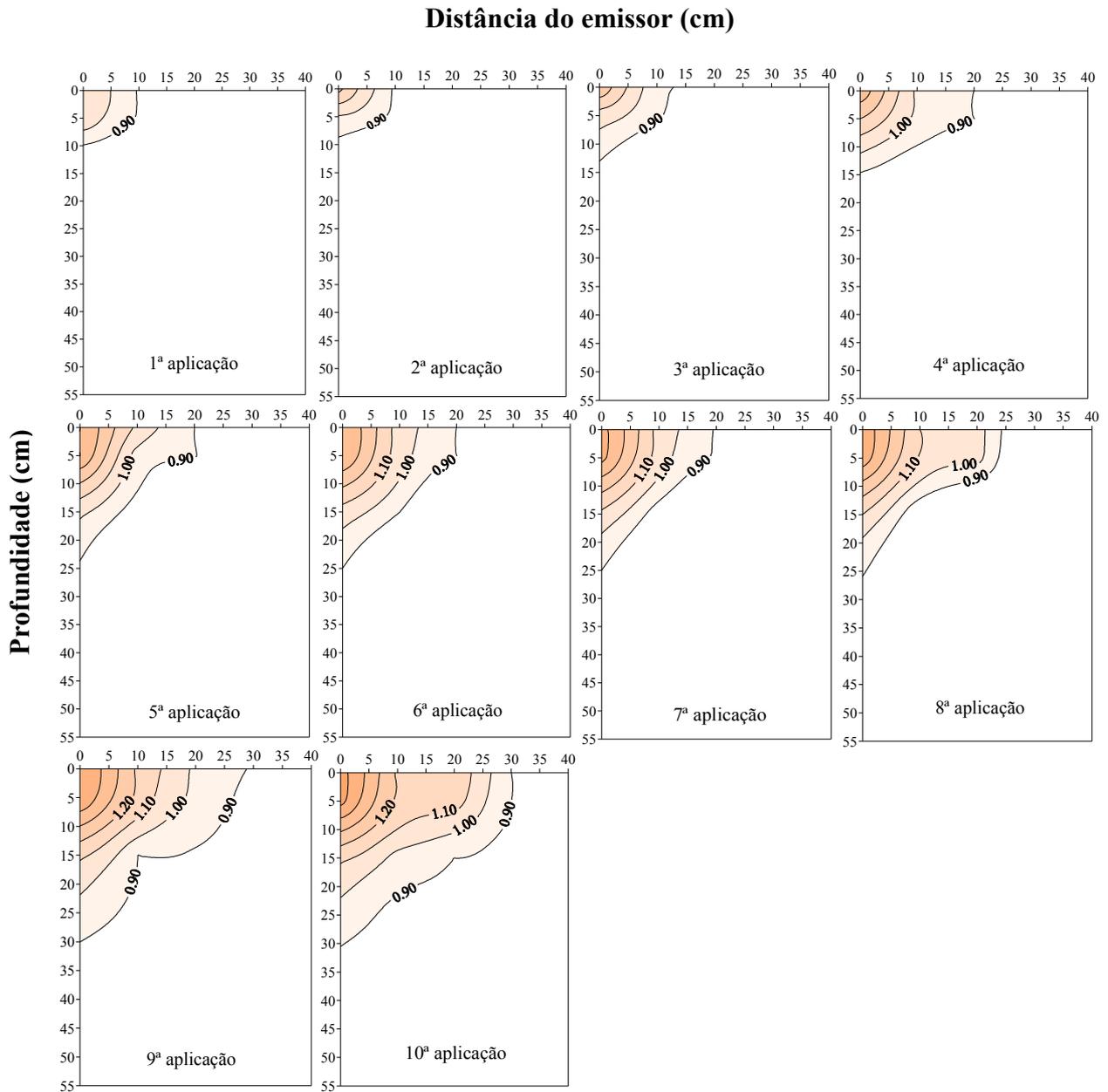


Figura 20 - Perfis de condutividade elétrica do solo (dS m^{-1}) ao final do processo de infiltração de cada aplicação da solução de KNO_3 para vazão de 8 L.h^{-1}

Neste mesmo ensaio também foi possível identificar o armazenamento do volume da solução e a concentração da solução no perfil do solo estudado. Na Tabela 2, têm-se os volumes de solução de distribuição da solução no solo, verifica-se que houve um maior armazenamento da solução na camada de 0-0,10 m, desde a 1ª até a 10ª aplicação da solução no solo nas diferentes vazões (2, 4 e 8 L.h⁻¹) e que nesta camada (0-0,10 m) o maior armazenamento do volume de solução ocorreu na vazão de 4 L.h⁻¹. Estes resultados também foram encontrados por Souza et al. (2006) em ensaios de laboratório para as mesmas vazões e tipo de solo.

Observou-se ainda que somente na vazão de 4 L.h⁻¹ a solução não atingiu a camada de 0,30-0,40 m, demonstrando que o armazenamento do volume da solução manteve-se nas camadas superiores do perfil do solo. Em contrapartida, na vazão de 2 L.h⁻¹ a camada de 0,4-0,5 m, foi atingida, logo após a 10ª aplicação da solução no solo, o que demonstra uma tendência à lixiviação dos nutrientes nesta vazão. No monitoramento do ensaio com vazão de 8 L.h⁻¹, verifica-se que somente após a 7ª aplicação a solução atingiu a camada de solo de 0,30-0,40 m. Desta forma, pode-se notar que a relação entre o armazenamento e a taxa de aplicação nas vazões de 4 e 8 L.h⁻¹ apresentou tendência em aumentar a distribuição do volume da solução em camadas superiores, o que não ocorreu na vazão de 2 L.h⁻¹.

Na Tabela 3, têm-se a concentração da solução para o perfil de distribuição do solo, nota-se que, assim como nos resultados dos dados da Tabela 2, durante todas as aplicações a maior concentração da solução no perfil do solo também ocorreu na camada de 0-0,10 m, nas diferentes vazões (2, 4 e 8 L.h⁻¹) e que entre essas vazões aplicadas a maior concentração da solução foi na vazão de 4 L.h⁻¹. Observou-se também, nas Tabelas 2 e 3 (volume *versus* concentração da solução), uma distribuição em gradiente da solução no perfil do solo estudado, sendo que houve uma maior concentração da solução próxima ao gotejador.

Tabela 2 – Volume de solução para o perfil de distribuição no solo.

Aplicações	Volume acumulado medido	Volume parcial medido	Distribuição da solução						CUC (%)
			Camadas (m)						
			0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	
Volume (L)									
2 L h⁻¹									
1 ^a	0,97	0,97	0,81	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	90
2 ^a	1,96	0,99	0,80	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	91
3 ^a	2,92	0,96	0,71	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	90
4 ^a	3,88	0,96	0,64	0,27	0,05	0,00	0,00	0,00	90
5 ^a	4,83	0,95	0,56	0,21	0,18	0,00	0,00	0,00	90
6 ^a	5,82	0,99	0,57	0,19	0,18	0,05	0,00	0,00	89
7 ^a	6,79	0,97	0,49	0,23	0,17	0,08	0,00	0,00	88
8 ^a	7,74	0,95	0,44	0,19	0,18	0,14	0,00	0,00	89
9 ^a	8,68	0,94	0,41	0,20	0,19	0,14	0,00	0,00	89
10 ^a	9,62	0,94	0,40	0,19	0,17	0,14	0,04	0,00	89
4 L h⁻¹									
1 ^a	0,95	0,95	0,90	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	95
2 ^a	1,90	0,95	0,80	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	96
3 ^a	2,88	0,98	0,80	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	96
4 ^a	3,84	0,96	0,72	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	95
5 ^a	4,80	0,96	0,70	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	95
6 ^a	5,75	0,95	0,64	0,27	0,04	0,00	0,00	0,00	95
7 ^a	6,70	0,95	0,65	0,23	0,07	0,00	0,00	0,00	95
8 ^a	7,67	0,97	0,59	0,29	0,09	0,00	0,00	0,00	94
9 ^a	8,66	0,99	0,60	0,30	0,09	0,00	0,00	0,00	94
10 ^a	9,60	0,94	0,53	0,28	0,13	0,00	0,00	0,00	94
8 L h⁻¹									
1 ^a	0,98	0,98	0,90	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	94
2 ^a	1,96	0,98	0,87	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	92
3 ^a	2,92	0,96	0,73	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	92
4 ^a	3,88	0,96	0,66	0,23	0,07	0,00	0,00	0,00	92
5 ^a	4,87	0,99	0,59	0,27	0,13	0,00	0,00	0,00	92
6 ^a	5,85	0,98	0,55	0,23	0,20	0,00	0,00	0,00	93
7 ^a	6,80	0,95	0,51	0,21	0,19	0,04	0,00	0,00	93
8 ^a	7,74	0,94	0,46	0,22	0,17	0,09	0,00	0,00	93
9 ^a	8,69	0,95	0,43	0,21	0,19	0,12	0,00	0,00	93
10 ^a	9,65	0,96	0,41	0,20	0,20	0,15	0,00	0,00	93

Tabela 3 – Concentração de solução para o perfil de distribuição no solo.

Aplicações	Volume acumulado medido	Volume parcial medido	Distribuição da solução						CUC (%)
			Camadas (m)						
			0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	
Concentração (mmol L⁻¹)									
2 L h⁻¹									
1 ^a	0,59	0,59	0,56	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	86
2 ^a	1,24	0,65	0,55	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	87
3 ^a	2,04	0,80	0,50	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	87
4 ^a	2,40	0,36	0,20	0,10	0,06	0,00	0,00	0,00	86
5 ^a	2,84	0,44	0,20	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	87
6 ^a	3,36	0,52	0,23	0,17	0,09	0,03	0,00	0,00	85
7 ^a	4,16	0,80	0,39	0,23	0,10	0,08	0,00	0,00	83
8 ^a	4,48	0,32	0,10	0,10	0,07	0,05	0,00	0,00	83
9 ^a	4,89	0,41	0,20	0,10	0,06	0,05	0,00	0,00	82
10 ^a	5,35	0,46	0,19	0,10	0,09	0,06	0,02	0,00	81
4 L h⁻¹									
1 ^a	0,82	0,82	0,60	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	88
2 ^a	1,73	0,91	0,59	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	88
3 ^a	2,06	0,33	0,20	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	89
4 ^a	2,75	0,69	0,49	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	87
5 ^a	3,35	0,60	0,38	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	86
6 ^a	3,65	0,30	0,15	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	86
7 ^a	4,02	0,37	0,17	0,13	0,07	0,00	0,00	0,00	83
8 ^a	4,84	0,82	0,50	0,23	0,09	0,00	0,00	0,00	81
9 ^a	5,20	0,36	0,17	0,10	0,09	0,00	0,00	0,00	80
10 ^a	5,53	0,33	0,15	0,13	0,05	0,00	0,00	0,00	81
8 L h⁻¹									
1 ^a	0,74	0,74	0,64	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	86
2 ^a	1,36	0,62	0,51	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	86
3 ^a	1,72	0,36	0,20	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	85
4 ^a	2,14	0,42	0,22	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00	83
5 ^a	2,51	0,37	0,22	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	82
6 ^a	3,34	0,83	0,37	0,25	0,21	0,00	0,00	0,00	81
7 ^a	3,91	0,57	0,20	0,19	0,16	0,02	0,00	0,00	82
8 ^a	4,33	0,42	0,17	0,11	0,09	0,05	0,00	0,00	83
9 ^a	4,85	0,52	0,19	0,14	0,10	0,09	0,00	0,00	82
10 ^a	5,23	0,38	0,15	0,10	0,08	0,05	0,00	0,00	82

4.5 Análise dimensional dos bulbos

A Figura 21 mostra a comparação entre os valores dimensionais dos raios (horizontal e vertical) dos bulbos nas vazões de 2, 4, e 8 L.h⁻¹, observados no experimento. Nota-se que na comparação entre os raios (horizontal e vertical) dos bulbos de 2 e 4 L.h⁻¹ (Figuras 21A e B) houve um maior avanço do raio horizontal no bulbo de 4 L.h⁻¹ e semelhança no raio vertical com ligeiro acréscimo dos bulbos de 2 L.h⁻¹.

Comparando-se os bulbos de 2 e 8 L.h⁻¹ (Figuras 21C e D) verificou-se dimensões semelhantes, tanto no raio vertical como no raio horizontal, porém em ambos os raios percebe-se uma evolução maior nas dimensões dos bulbos de 2 L.h⁻¹. Este acréscimo também pode ser evidenciado na comparação das Figuras 15 e 17 dos perfis de umidade.

Analisando-se a comparação entre os raios (vertical e horizontal) dos bulbos de 4 e 8 L.h⁻¹ (Figuras 21E e F), nota-se uma evolução acentuada do raio horizontal do bulbo de 4 L.h⁻¹ em relação ao bulbo de 8 L.h⁻¹ e semelhança entre os raios verticais. Nota-se também que a maior vazão aplicada, 8 L.h⁻¹, não proporcionou um maior avanço da superfície horizontal, quando comparada com as vazões de 2 e 4 L.h⁻¹. Resultados que vão de encontro aos apresentados por Souza et al. (2007) para condições de laboratório; porém, situação diferente foi encontrada por Rosa et al. (2004) em ensaios de laboratório, o autor relata que houve um incremento no raio horizontal com o aumento da vazão. Os resultados apresentados podem auxiliar no manejo da irrigação bem como no planejamento de projetos relacionados ao assunto, principalmente quando aplicados no dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento com o auxílio de modelos matemáticos, que podem ser encontrados na literatura (WOODING, 1968; BRANDT et al. 1971; RAATS, 1971; PHILIP, 1971; BEN-ASHER et al., 1978; CLOTHIER e SCOTTER, 1982; CLOTHIER, 1984; OR, 1995; OULD MOHAMED EL-HAFEDH et al., 2001).

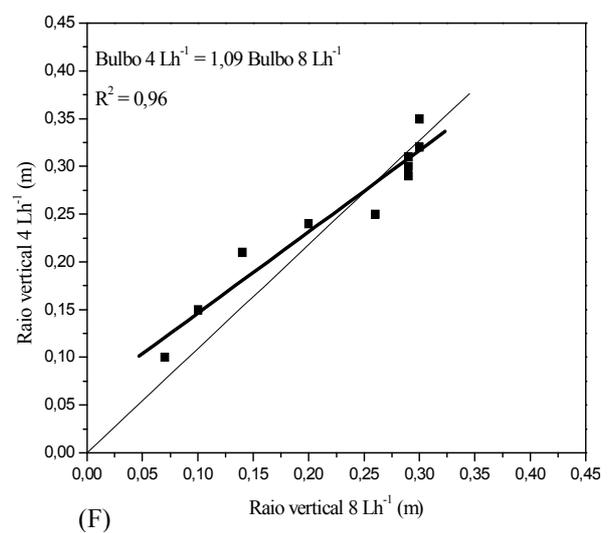
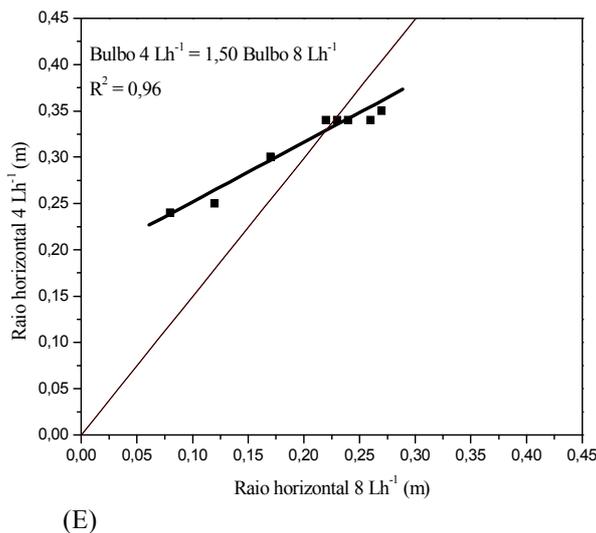
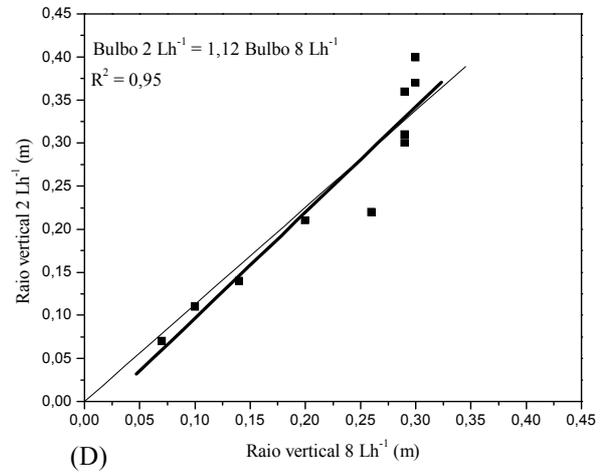
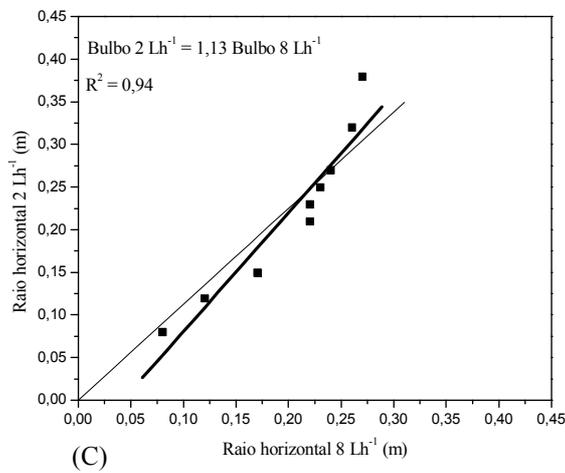
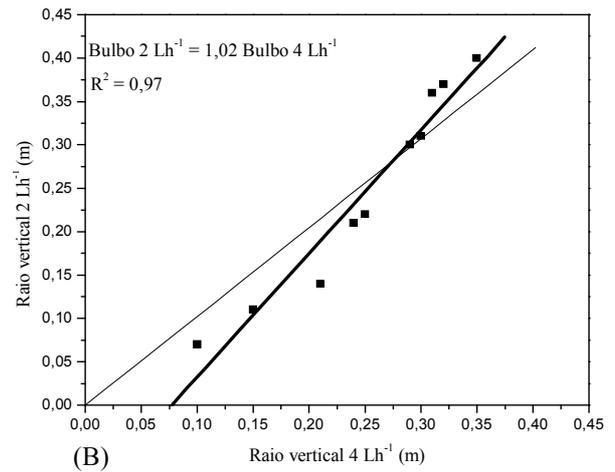
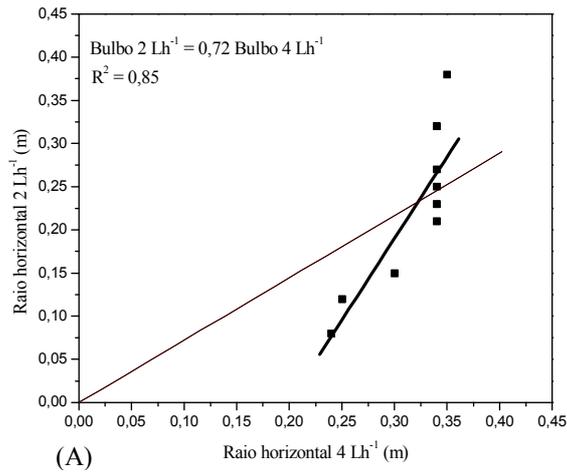


Figura 21 - Análise dimensional dos bulbos (A) 2 L.h⁻¹ versus 4 L.h⁻¹ horiz. (B) 2 L.h⁻¹ versus 4 L.h⁻¹ vertical (C) 2 L.h⁻¹ versus 8 L.h⁻¹ horiz. (D) 2 L.h⁻¹ versus 8 L.h⁻¹ vertical (E) 4 L.h⁻¹ versus 8 L.h⁻¹ horiz. (F) 4 L.h⁻¹ versus 8 L.h⁻¹ vertical.

4.6 Análise de uniformidade de distribuição da solução no solo

Tendo como propósito entender as diferenças entre os valores de umidade individual estimada dentro de um volume de controle, assumiu-se um volume de solo central no bulbo molhado para efetuar uma análise de uniformidade de distribuição comparativa. Desta forma, foi possível calcular os coeficientes de uniformidade de Christiansen (1941) para as umidades estimadas após cada aplicação da solução, nas vazões de 2, 4 e 8 L.h⁻¹, seguindo-se a metodologia adaptada por Wu e Gitlin (1983) e Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001), por meio da seguinte equação:

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{X N} \right] \quad (7)$$

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Distribuição de Christiansen (%);

X_i = Umidade Volumétrica estimada (m³.m⁻³);

X = Umidade Volumétrica média (m³.m⁻³);

N = Número de pontos estimados.

O volume de controle adotado foi 0,40 x 0,40 x 0,50 m, respectivamente, comprimento, largura e profundidade, sendo o gotejador posicionado no ponto central.

A Figura 22 apresenta uma avaliação da umidade volumétrica média no volume de controle adotado, facilitando o entendimento de alguns problemas relacionados à uniformidade de distribuição da solução no solo.

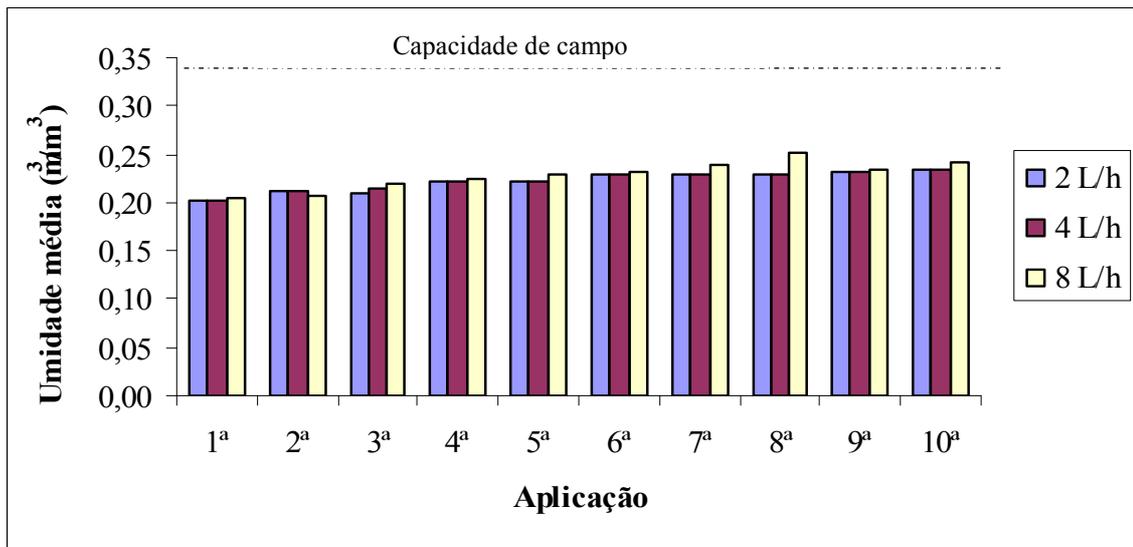


Figura 22 – Umidade volumétrica média dentro do volume de controle após a aplicação da solução no solo

Através dos dados obtidos verificou-se que a capacidade de campo do solo (34%) não foi atingida em nenhum momento no decorrer das aplicações da solução sob as diferentes vazões adotadas (2, 4 e 8 L.h⁻¹), porém, as umidades médias tiveram um pequeno aumento com o volume de solução aplicado no solo, tornando-se visível nas aplicações de 8 L.h⁻¹, que inicialmente atingiram umidade de 20,5%, e durante as aplicações atingiram picos de 25%. Contudo, através dos dados observados, pode-se dizer que não houve uma estabilização da umidade média e com o acréscimo do volume aplicado houve um ligeiro aumento da umidade dentro do volume de controle .

Na Figura 23 têm-se os valores da uniformidade de distribuição da solução no solo, após cada aplicação sob as diferentes vazões utilizadas (2, 4 e 8 L.h⁻¹).

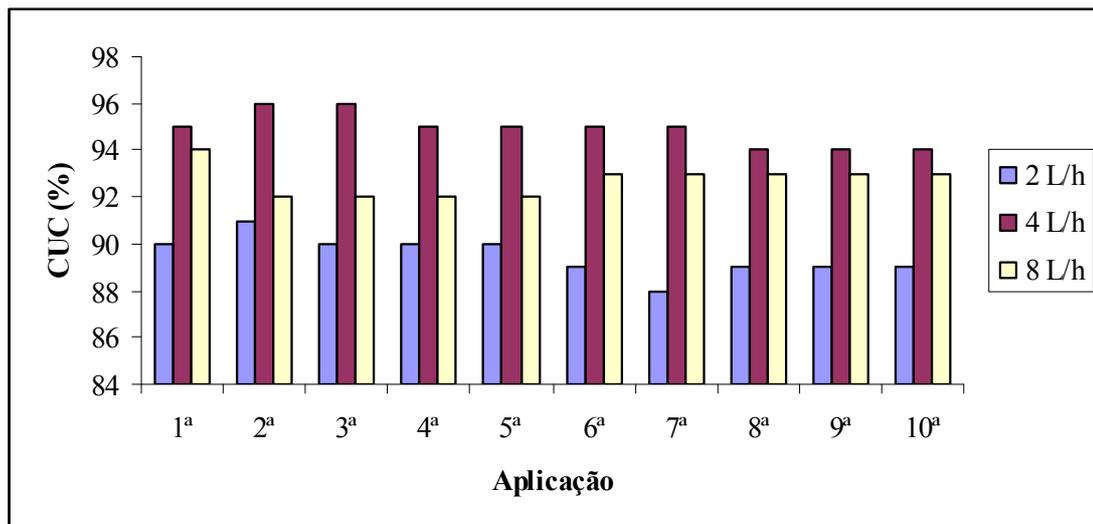


Figura 23 – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para solução do solo em função da vazão aplicada

Fazendo-se uma análise comparativa entre as vazões adotadas, nota-se que na vazão de 2 L.h⁻¹ os valores de uniformidade mostraram-se inferiores aos da vazão de 4 e 8 L.h⁻¹ durante todas as aplicações. O coeficiente de uniformidade (CUC) na vazão 2 L.h⁻¹ manteve-se entre 88% e 90%, desde a 1ª até a 10ª aplicação, tendo um ligeiro decréscimo no decorrer das aplicações, porém, não teve uma grande variação se comparado com a média de uniformidade das vazões (92%). No entanto, verifica-se que com o aumento da vazão de 2 L.h⁻¹ para 4 L.h⁻¹ o coeficiente de uniformidade também aumentou, mantendo-se entre 94% a 96%, sendo estes os melhores valores de uniformidade encontrados nas diferentes vazões, apresentando também uma diminuição gradativa dos valores após a 2ª aplicação de solução no solo.

Observou-se na vazão de 8 L.h⁻¹ que os coeficientes de uniformidade mantiveram-se intermediários entre as vazões de 2 e 4 L.h⁻¹ no decorrer das aplicações, porém ao contrário das vazões de 2 e 4 L.h⁻¹, a partir da 2ª aplicação houve um aumento nos coeficientes de uniformidade até a 10ª aplicação. Os resultados demonstram uma boa distribuição da solução no solo, uma vez que a disponibilidade dos nutrientes de forma homogênea na região do sistema radicular da cultura é estimada para coeficientes de uniformidade superiores a 80%.

Este resultado reflete a homogeneidade no volume de solo molhado próximo ao gotejador. Em cultura intensiva, o teor de água dos solos pode atingir mais de 80% de uniformidade de distribuição (KELLER e KARMELI, 1975). Ould Mohamed El-Hafedh et al. (2001) apresentam um coeficiente de uniformidade de 90% e sugerem que este valor deve ser aceito no sistema de irrigação por gotejamento, principalmente, devido à saturação das zonas próximas ao gotejador. Também, Zocoler (1999) recomenda valores entre 82 a 88% do CUC, para as culturas cujo sistema radicular explora, basicamente, os primeiros 40 cm do solo.

Na Figura 22 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 (2, 4 e 8 L.h⁻¹) de aplicação da solução no solo .

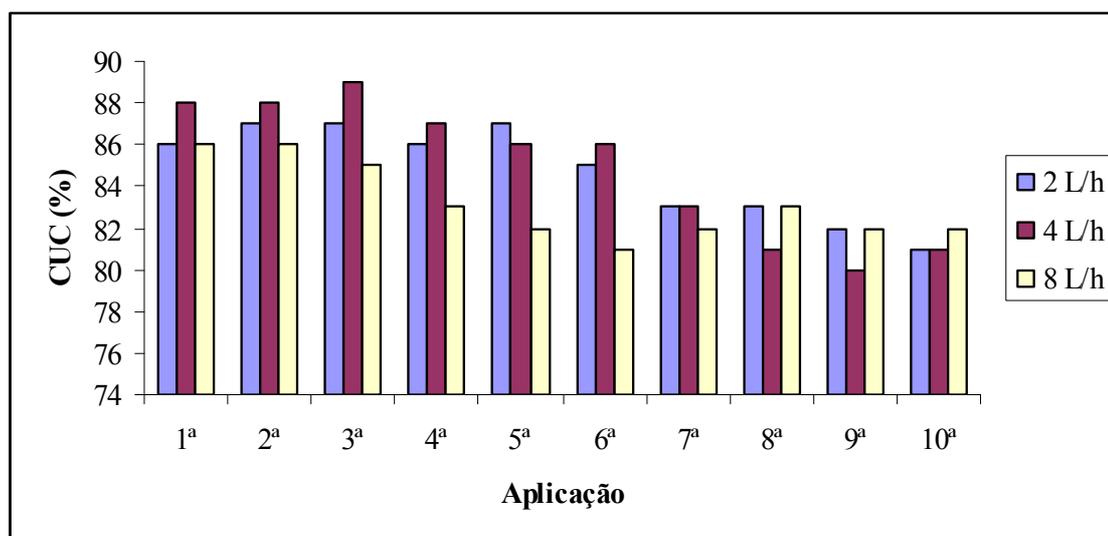


Figura 24 – Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para condutividade elétrica em função da vazão aplicada

O coeficiente de uniformidade da condutividade elétrica obteve média de 84%, sendo que os maiores valores foram encontrados durante as primeiras aplicações de solução no solo. Verificou-se que no decorrer das aplicações houve uma diminuição gradativa da uniformidade, ficando evidenciado quando comparamos as primeiras com as últimas

aplicações nas três vazões (2, 4 e 8 L.h⁻¹) e que os maiores valores de uniformidade foram encontrados na vazão de 4 L.h⁻¹ com média de 85%.

Analisando-se os dados obtidos no CUC da condutividade elétrica, pode-se afirmar que para este ensaio o efeito da aplicação na vazão de maior volume de solução (8 L.h⁻¹) não teve importância para a melhoria do CUC. Esta constatação reforça a importância de se conhecer a distribuição da solução no solo, através de diferentes combinações de vazões de gotejadores. Assim, a solução poderá ser mais uniformemente distribuída no solo, pois aumentando-se o CUC dos valores observados acima, conseqüentemente, o soluto será distribuído homogeneamente para o sistema radicular da planta, reduzindo a perda de íons através do processo de lixiviação e contribuindo para o transporte do nutriente para as raízes por fluxo de massa e mecanismos de difusão.

5 CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser retiradas dos resultados: (1) Com a devida calibração, a TDR e a metodologia aqui apresentadas são muito promissoras no estudo da dinâmica da solução no solo; (2) Uma correlação direta foi encontrada entre a evolução do disco saturado e da área superficial molhada do solo em condições de campo; (3) As interações entre os diferentes perfis (teor de água *versus* condutividade elétrica) revelaram um gradiente de distribuição da solução no solo, com maior armazenamento de solução próximo ao gotejador (4) Para as condições de solo e de acordo com o volume e a frequência utilizada durante este experimento, recomenda-se a aplicação de pequenas quantidades de solução em intervalos mais frequentes para reduzir a perda por percolação de água e solutos.

REFERÊNCIAS

- 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. [CD-ROM]
- AZEVEDO, H. M. Irrigação localizada. **Inf. Agropec.** v.12, p.40-53, 1986.
- 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 America Journal**, v.64, p.818-826, 2000.
- BEN-ASHER, J.; LOMEN, D.O.; WARRICK, A.W. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, p.3-6, 1978.
- BHUMBLA, D.K. **Agricultura practices ande nitrate pollution of water**. Disponível em: <<http://www.caf.wuv.edu/~forage/nitratepollution/nitrate.html>> acesso em: 18 de maio de 2007.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em um ambiente protegido. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, p.29, 2000, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Universidade Federal de Pernambuco/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000.
- BLANCO, F.F.; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em um ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p. 76-80, 2001.
- BRESLER, E. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. **Irrigation Science**, New York, v.1, p.3-17, 1978.
- BRANDT, A.; BRESLER, E.; DINER, N.; BEN-ASHER, J.; HELLER, J.; GOLDBERG, D. Infiltration from a trickle source. I Mathematical models. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.35, p.675-683, 1971.
- BRESLER, E.; HELLER, J.; DINER, N.; BEN ASHER, J.; BRANDT, A.; GLODBERG, D. Infiltration of trickle source: Experimental data and theoretical predictions. **Science Society of America Proceedings**, v.35, p.683-689, 1971.
- CHRISTIANSEN, J.E. The uniformity of application of water by sprinkler systems. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.22, p.89-92, 1941.
- CARRIJO, O.A.; SILVA, W.L.C.; MAROUELLI, W.A.; SILVA, H.R. Tendências e desafios da fertirrigação no Brasil. In: Folegatti, M.V. (Coord.) **Fertirrigação**: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, p.155-169, 1999.
- CLOTHIER, B.E. Solute travel times during trickle irrigation. **Water Resources Research**, Washington, v.20, p.1848-1852, 1984.

CLOTHIER, B.E.; SCOTTER, D.R. Constant-flux infiltration from a hemispherical cavity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p.696-700, 1982.

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

CHRISTOFIDIS, D. **Recursos hídricos e irrigação no Brasil**. In : Workshop Disponibilidade de água e irrigação no Nordeste, 1999, Brasília texto...ISPN, 34p., 1999.

COELHO, E. F.; OR, D.; ANDRADE, C.L.T. Avaliação de regime permanente em irrigação por gotejamento e posicionamento de sensores de umidade e de potencial matricial no bulbo molhado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, p.327-1333, 1995.

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

COELHO, E.F.; ARRUDA, F.B. Aplicações da técnica de TDR: Manejo de água no solo. In: Matura, E.E.; JAVAREZ J., A.; GOMES, E.P.; SOUZA C.F. (ed.). Aplicações da técnica da TDR na Agricultura. Campinas: **Feagri/Unicamp**, cap. 7, p.129-145, 2001.

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**, v. 19, p.189-199, 1996.

CONCIANI, W.; CARNEIRO, B.J.; SOARES, M.M.; HERRMANN, P.S.P.; CRESTANA, S. Emprego TDR com sondas multihastes segmentadas para medida de umidade de um perfil de solo. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária, 1, 1996, São Carlos, **Anais...** São Carlos: EMBRAPA – CNPDIA, 1997, p. 169.

DALTON, F.N.; HERKELRATH, W.N.; RAWLINS, D.S.; RHOADES, J.D. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Science**, v.224, p.989-990, 1984.

DALTON, F.N. Development of time-domain reflectometry for measuring soil-water content and bulk soil electrical conductivity. p. 143-167. In: G. C. Topp et al. (eds). Advances in measurement of soil physical properties: Bring theory into practice. SSSA. **Spec. Publ.** 30 SSSA, Madson, WI, 1992.

DASBERG, S.; BRESLER, E. . Drip irrigation manual. **Bet Dagan**. Israel: III-C Publications 9, 1985.

DASBERG,S. ; OR, D. **Drip Irrigation**. **Berlim: Springer**, 1999, 152p

DAVIS, J. L.; ANNAN , A. P. Electromagnetic detection of soil moisture. Progress Report, 1. **Canadian J. Rem. Sens.**, v.3, p.76-86, 1997.

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

EMBRAPA. **Agricultura e Qualidade da água: Contaminação da Água por Nitrato**. Planaltina (DF), 2002. 13-16 p.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos: **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.

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. **J. Environ. Quality**, v. 20, p. 658-662, 1991.

FAVARO, R. B. T. **Estudo da metodologia de TDR para avaliar os impactos causados pelo nitrato aplicados via fertirrigação**. Monografia de Graduação. Taubaté:UNITAU, 2005, 17p.

FOLEGATTI, M.V. ; CASARINI, E. Aspectos relevantes na fertirrigação de flores e hortaliças. . In: Folegatti, M.V. (Coord.) **Fertirrigação** : citrus, flores e hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999.

FELLNER-FELDEGG, H. The measurement of dielectrics in the time domain. **J. Phys. Chern.**, v.73, p.616-623,1969.

GARNIER, E.; BERGER, A.; RAMBAL, S. Water balance pattern of soil water uptake in a peach orchard. **Agric. Wat. Manage.** v.11, p.145-158,1986.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: Improved analysis of the step response waveform. **Adv. Mol. Relax. Proc.**, v.7, p.45-59, 1975.

GREEN, S. R.; CLOTHIER, B. E. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. **Plant and soil**. v.73, p. 317-328, 1995.

HAGIN, J.; LOWERGART, A. Fertirrigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. **Fertil. Res.**, 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**. v.145, p.187-196, 1992.

HEIMOVAARA, T.J. Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. **Soil Science Society America Journal**.v.57, p.1410-1417, 1993.

HEIMOVAARA, T.J.; FOCKE, A.G.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J.M. Assessing temporal variations in soil water composition in time domain reflectometry. **Soil Science Society America Journal**.v.59, p.689-698, 1995.

HERRMANN, P.S.P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. Dissertação de Mestrado. São Carlos: EEESC – USP, 1993, 124 p.

- HOCHMUTH, G.J. Fertilizer management with drip irrigation for vegetables. Using plasticulture technology for the intensive production of vegetable crops. **Am. Soc. Hort. Sci., Lexington, Kentucky**. p.16-22, 1994.
- HUBBARD, R.K.; LEONARD, R.A.; JOHNSON, A.W. Nitrate transport a sandy coastal plain soil underlain by plinthite. **Trans. of the ASAE**, v. 34, p. 802-808, 1991.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. Sprinkle and trickle irrigation. New York: **Chapman and Hall**, 1990, 652p.
- MALICKI, M.A.; WALCZAK, R.T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, n.50, p.505-514, 1999.
- MARQUELLI, W. A., SILVA, W. L. C. 2000. **Irrigação**. In: J. B. C. Silva & L. B. Giordano (Eds.).Tomate para processamento industrial. Embrapa, p.60-71, 2000.
- MARTINS, E.; LOPES, L.N.; SOUZA, C.F. Utilização da técnica de tdr para monitoramento e manejo da fertirrigação. In: XII Mostra de Iniciação Científica, 2007, Taubaté. **Anais**. Universidade de Taubaté, ENIC, 2007. . [CD-ROM]
- MMOLAWA, K.; Or, D. Root zone salute dynamics under drip irrigation: A review. **Plant and Soil**. v. 222, p. 163-190, 2000.
- MOJID, A. M.; MALICKI, M. A. Comments on measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. **European Journal of Science**, Amsterdam, n.50, p.181-183, 1999.
- MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resour. Res.**, v. 27, p. 2771-2777, 1991.
- NADLER, A. Effect of soil structure on bulk electrical conductivity (EC) using the TDR and 4p techniques. **Soil Sci.**v. 152, p. 199-203, 1991.
- NADLER, A.; GAMLIEL, A.; PERETZ, I. Practical aspects salinity effect on TDR-measurement water content: a field study. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 63, p. 1070-1076, 1999.
- NOBORIO, K.; Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Comp. and Elec. In Agr.**, v.31, p.213-237, 2001.
- NASCIMENTO, T.; SOARES, J.M. Bulbo infiltrômetro. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABIRD, 1988. p. 1207-12018.
- NUGENT, M. ; KANRIM, M.A. ; WOLFSON, L. ; D'ITRI, F.M. **Nitrate: a drinking water concern Michigan State University Extension bulletin WQ-19**. Disponível em: <http://www.gem.msv.edu/pubs/msve>. Acesso em: 18 de maio de 2007.
- OULD MOHAMED EL-HAFEDH, A.V.; DAGHARI, H.; MAALEJ, M. Analysis of several discharge spacing-duration combinations in drip irrigation system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.52, p. 33-52, 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, 1995.
- PHILIP, J.R. General theorem on steady infiltration from surface sources, with application to point and line sources. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.35, p.867-871, 1971.
- QUEIROZ, S. O. P. **Método para avaliação de salinização do solo sob condições de ambiente protegido**. 2004, 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- RAATS, P.A.C. Steady infiltration from point sources, cavities, and basins. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.35, p.689-695, 1971.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.
- RHOADES, J.D.; RAATS, P.A.; Prather, R.J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 40, p. 651-655, 1976.
- RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 53, p. 433-439, 1989.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washigton: USDA, 1954. 160 p. (USDA. Agricultural Handbook, 60).
- RIVERA, R.N.C. **Modelagem da dinâmica da água e do potássio na irrigação por gotejamento**. Piracicaba, 2004. 89p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP.
- ROSA, C.I.L.F.; FREITAS, P.S.L.; GONÇALVES, A.C.A. Dimensões de bulbo molhado no solo, a partir de fonte pontual de água para manejo de água na cultura da pupunha. **Acta Scientiarum Agronomy**. Maringá, v.6, n.2, p. 169-174, 2004.
- SALLES, E.S. **Efeito da vazão e do volume de água aplicados por um emissor pontual nas dimensões do bulbo molhado em um Latossolo vermelho-escuro álico**. Dissertação de Mestrado. Viçosa: UFV, 1990, 66p.
- SOUSA, V.F.; COELHO, E.F. Manejo da 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, , p. 289-317, 2001.
- SOUZA, C.F., MATSURA, E.E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.6, n.1, p.63 - 68, 2002.

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.; DAROZ, T.H.C.; FOLEGATTI, M.V.; COLOMBO, A. Parâmetros geométricos do bulbo molhado para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.17, 2006.

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, 2006.

SOUZA, C.F.; SILVA, E.F.F.; FOLEGATTI, M.V.; OR, D. Irrigação por gotejamento: disco saturado e área superficial molhada versus distribuição e armazenamento da água no solo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.1, n.1, p. 65-71, 2006.

SOUZA, C. F.; MARTINS, R. B. T. ; FOLEGATTI, M. V. ; DAROZ, T. H. C. ; SILVA, E. F. F. . Uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para avaliar a distribuição do nitrato no volume molhado do solo sob fertirrigação. **Magistra**, v. 19, p. 112-122, 2007.

SCALLOPI, E.J.Critérios básicos para seleção de sistemas de irrigação. **Inf. Agropec.**,v.12, p.54-65, 1986.

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.

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**, v. 58, p. 307-324, 1982.

TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry)**. Tese de Doutorado. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997, 167p.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Eletromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines. **Water Res. Res.**, v. 16, p. 574-582, 1980.

VALOCCHI, A.J., 1984. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. **Water Resour. Res.** 20, p. 499-503.

VIEIRA, D. B. Irrigação gota-gota. In : **Seminário Nacional de Irrigação e Drenagem**.v.3, p.18-30, 1975.

VILLAS BOAS, R.L.; BOARETTO, A.E.; VITTI, G.C. Aspectos da fertirrigação In: VITTI, G.C.; BOARETTO, A.E. (Coord.). **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: Potafós, 1994. p.283-308.

WARD, A.L.; KACHANOSKI, R.G.; ELRICK, D.E. Analysis of water and solute transport away from a point source. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 59, p. 699-706, 1995.

WIENS, P.E.; SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E.; QUEIROZ, S.O.P. Avaliação da técnica da TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) no estudo da dinâmica de solutos no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Salvador. **Anais...** Salvador: SBEA/UFBA, 2002. [CD-ROM]

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

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

WU, I.P.; GITLIN, H.M. **Irrigations efficiencies of surface, sprinkler and drip irrigation**. PROC. 2° WORD CONGR. ON WATER RESOURCE WATER FOR HUMAN NEEDS, New Delhi, India, p.191-199, 1975.

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

ZOCOLER, J.L. Avaliação do desempenho de sistemas de irrigação In: Curso Capacitação em Agricultura Irrigada, 1999, Ilha Solteira, **Anais...** Ilha Solteira: UNESP/FEIS, 1999, 55p.

Autorizo cópia total ou parcial desta obra, apenas para fins de estudo e pesquisa, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem prévia autorização específica do autor.

Leonardo do Nascimento Lopes
Taubaté, 02 de Fevereiro de 2009

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)