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

**Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo,
sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de
capacitância e extratores de solução**

Elenilson Moreira Franco

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

**Piracicaba
2009**

Elenilson Moreira Franco
Engenheiro Agrônomo

Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução

Orientador:
Prof. Dr. **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

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

**Piracicaba
2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Franco, Elenilson Moreira

Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução / Elenilson Moreira Franco. - - Piracicaba, 2009.

85 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Água do solo - Monitoramento 2. Fertirrigação 3. Íons - Distribuição 4. Irrigação por gotejamento 5. Nitratos 6. Potássio 7. Solutos - Monitoramento I. Título

CDD 631.7
F825m

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

Dedico este trabalho

Primeiramente a Deus, pois sem Ele nada seria possível e não estaríamos reunidos, desfrutando, juntos, destes momentos que nos são tão importantes.

Aos meus pais Sebastião de Jesus Franco e Maria Barbosa Moreira, aos meus irmãos, meus sobrinhos (Gabriel, Taciane Taciele) e, em especial, à minha irmã Suelândia Moreira Franco; pelo esforço e compreensão, em todos os momentos desta e de outras caminhadas.

Dedico também a todos àqueles que acreditam que a ousadia e o erro são caminhos para as grandes realizações.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus (nosso pai e mentor de todas as coisas), por me reservar saúde e proteção, e por me cercar de tantas pessoas maravilhosas.

Obrigado a minha família, mãe, pai e irmãos (em especial à minha irmã), pelo estímulo constante e apoio durante este longo percurso.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia Rural e Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade e por terem me atendido, sempre dedicados e com competência profissional, todas as vezes que precisei.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

Ao CNPq, pela concessão da bolsa e pelo auxílio financeiro dado ao projeto.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural, pois suas aulas foram lições em muitos sentidos, para mim. Fizeram escola e estão formando seguidores. Só posso lhes dizer uma coisa. Muito obrigado!

Ao Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda, um muito obrigado especialíssimo por seu incentivo, orientação, amizade e, principalmente, por sua confiança e a credibilidade depositada em minha pessoa.

À pesquisadora do IAC, Dra. Regina Célia de Matos Pires, devo uma co-orientação informal, conduzindo-me, como excelente pesquisadora que é, desde a montagem do projeto; além do empréstimo de equipamentos.

Aos professores Dr. Marcelo Eduardo Alves e Dra. Sônia Maria de Stefano Piedade, pela contribuição, dentro de suas áreas, para o desenvolvimento deste

trabalho e, principalmente pela dedicação e empenho que demonstraram no decorrer de suas atividades para comigo.

Obrigado, também, aos estudantes de agronomia da ESALQ/USP, Luciano Alves, Paula Fernandes de Oliveira e Pedro Henrique Chinelato que, mesmo no período de suas férias, estiveram sempre à disposição e acompanharam todas as etapas do experimento.

Também, recebi ajudas preciosas de diversos amigos. Cícero Renê (meu amigo e conterrâneo) e Cláudio Uyeda me auxiliaram de muitas formas, em diferentes momentos, inclusive com ótimas sugestões, tanto de natureza técnica como científica.

Meu amigo Carlindo Rodrigues, que além da amizade, compartilhou seus conhecimentos num indispensável auxílio durante a análise estatística deste trabalho.

Aprendi muito com os amigos e conterrâneos, Leandro e Marlon (pelos quais tenho muito apreço), sempre auxiliando nos trabalhos uns dos outros. Muito obrigado a vocês pela amizade, solidificada ao longo dessa jornada, que certamente se eternizará.

Agradeço aos amigos Jaedson e João Batista, por dividirem apartamento comigo e, principalmente, pela fácil convivência, tornando menos árdua a falta de nossas famílias; pois, assim como eu, estão longe das pessoas e lugares que amam em busca de um ideal comum.

Um muito obrigado, com muito carinho, a todos os colegas de pós-graduação, pelos momentos partilhados e pelo mútuo aprendizado, durante nossa convivência, no campo profissional e particular. Prezo pela continuidade de nossas amizades, mesmo após a conclusão de nossos cursos. Amigos, gratidão eterna!!!

A todos os parentes, mestres e amigos, que não tiveram seus nomes aqui citados; mas que, de alguma forma contribuíram para que este momento pudesse acontecer, reitero aqui minhas palavras dizendo que, mesmo sendo um trabalho individual e muitas vezes solitário, não se pode empreendê-lo sem a ajuda dos que nos cercam e querem bem. MUITO OBRIGADO A TODOS!!!

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 DESENVOLVIMENTO	15
2.1 Considerações iniciais.....	15
2.1.1 Irrigação e fertirrigação.....	15
2.1.2 Técnicas de monitoramento da umidade e solutos no solo.....	17
2.1.3 Uso de extratores de cápsula porosa para extração da solução do solo	21
2.1.4 Uso da Sonda Diviner 2000 para monitoramento da umidade no solo	22
2.1.5 Transporte do íon nitrato no solo.....	25
2.1.6 Transporte do íon potássio no solo	27
2.2 Material e Métodos.....	29
2.2.1 Localização e caracterização experimental.....	29
2.2.2 Instalação do experimento	29
2.2.3 Calibração da sonda Diviner 2000®.....	32
2.2.4 Tratamentos e delineamento experimental	34
2.2.5 Sistema e manejo da fertirrigação	35
2.2.6 Monitoramento da umidade do solo	38
2.2.7 Extração da solução do solo	38
2.2.8 Análise química da solução do solo	39
2.2.9 Elaboração dos mapas com os resultados.....	40
2.2.10 Análise estatística dos dados	40
2.3 Resultados e Discussão	41
2.3.1 Calibração da sonda Diviner 2000	42
2.3.2 Distribuição da água no solo perfil do solo	44
2.3.3 Distribuição do íon nitrato no perfil do solo.....	47
2.3.4 Distribuição do íon potássio no perfil do solo	51

2.3.5 Distribuição do pH no perfil do solo	55
2.3.6 Distribuição da CE no perfil do solo	59
3 CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS.....	64
ANEXOS	70

RESUMO

Monitoramento da dinâmica da água e solutos em um perfil de solo, sob sistema de fertirrigação por gotejamento, utilizando sonda de capacitância e extratores de solução

O princípio básico da irrigação é a reposição ou complementação hídrica necessária visando alcançar a máxima potencialidade fisiológica dos cultivos, buscando maiores produtividades, principalmente mediante uma aplicação racional da quantidade de água. Portanto, o domínio de técnicas que possam ser aplicadas para manejar a aplicação da água e nutrientes via irrigação passa a ter um papel importante em todo esse processo e a obtenção de valores de umidade do solo é fundamental em estudos que envolvem a dinâmica da água, bem como, de solutos no solo, pois indica qual a condição hídrica que o solo se encontra. Os métodos classificados como diretos, são quando permitem determinar diretamente a umidade do solo, e indiretos, quando permitem estimar a umidade a partir de medições de resistência elétrica, de potencial da água no solo, etc. Diante disso, objetivou-se por meio da utilização de extratores de cápsula porosa e sonda de capacitância 'Diviner 2000', conhecer o processo de redistribuição da água aplicada por um sistema de gotejamento em dois solos distintos (arenoso e argiloso), buscando apontar vantagens e desvantagens da utilização da sonda de capacitância; bem como, avaliar o efeito de diferentes cenários hídricos sobre a distribuição dos íons nitrato e potássio no solo. O experimento foi conduzido em uma casa de vegetação, na qual foram distribuídas 18 bombonas plásticas, cada uma medindo, 0,6 e 0,8 m de diâmetro e altura, respectivamente, as quais foram posteriormente preenchidas, de forma inteiramente casualizada, com dois solos de texturas distintas (arenosa e argilosa). Em cada bombona foram instalados 6 extratores de cápsula porosa para obtenção da solução do solo. Os extratores instalados formavam um semicírculo em volta de um tubo de PVC (DE = 56,5 mm, DI = 51 mm e comprimento de 1,0 m) fixado ao solo, no interior de cada bombona, para inserção da sonda Diviner 2000. Os tratamentos utilizados neste experimento foram obtidos pelas combinações dos 2 solos e 3 vazões de gotejadores (2 L h^{-1} , 4 L h^{-1} e 8 L h^{-1}) para aplicação de solução fertilizante (Uréia e Cloreto de potássio), totalizando 6 tratamentos, os quais foram distribuídos em delineamento experimental inteiramente casualizado, com 3 repetições. As variáveis de estudo desta pesquisa foram a umidade do solo, o potencial de hidrogênio (pH), condutividade elétrica (CE), concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) e concentração de potássio ($[\text{K}^+]$) na solução do solo. Utilizou-se um sistema de irrigação localizada (gotejamento), para aplicação da solução fertilizante (Uréia e cloreto de potássio). Pelos resultados obtidos pôde-se concluir que o uso da técnica da FDR, por meio da sonda Diviner 2000, mostrou-se apropriada para a obtenção da umidade no solo, apresentando como vantagens a rapidez e precisão na obtenção das leituras. A fertirrigação por gotejamento em taxas de aplicação elevadas promovem o deslocamento de íons em profundidade no perfil do solo, sendo esse efeito mais intensificado no solo de textura arenosa, por apresentar menor interação com os íons nitrato e potássio na solução do solo.

Palavras-chave: Fertirrigação; Distribuição de íons; Nitrato; Potássio; Sonda Diviner

ABSTRACT

Monitoring of water and solute dynamics in a soil profile, under drip fertigation system, using a capacitance probe and porous ceramic cup extractors

The basic principle of irrigation is to replace or complement the water requirements to reach the maximum physiologic potentiality of the crops to increase yields. Therefore, the domain of techniques that can be applied to manage water and nutrient application has an important role in the process. Monitoring soil moisture is fundamental in studies that involve water dynamics and nutrient movement in soil. Direct methods include the measurement of soil moisture directly and indirect methods measure soil moisture from measurements of electric resistance, soil water potential, etc. The objective of the present research was to determine the process of water redistribution applied by a drip irrigation system in two different soils (sandy and clay) by using porous ceramic cup extractors and a capacitance probe ('Diviner 2000'). Advantages and disadvantages of the capacitance probe were tested to evaluate the effect of different water scenarios on the distribution of nitrate and potassium ions in soil. Eighteen soil blocks 0.6 tall and 0.8 m in diameter were constructed. The blocks were filled with two different soil textures (sandy and clay). In each box, 6 porous ceramic cup extractors were installed to obtain the soil solution. The extractors formed a semicircle around a PVC pipe (External Diameter of 56.5 mm, Internal Diameter of 51 mm and length of 1.0 m) placed into the soil of each plastic box to insert the capacitance probe. The treatments used in this experiment were the combinations of the 2 soils and 3 emitters flows from a drip irrigation system, (2 L h^{-1} , 4 L h^{-1} and 8 L h^{-1}) with application of fertilizing solution (urea and potassium chloride). The 6 treatments were distributed in a completely randomized experimental design with 3 replications. The study variables of this research were the soil moisture, pH, electric conductivity (EC), nitrate concentration ($[\text{NO}_3^{-1}]$) and potassium concentration ($[\text{K}^+]$) in the soil solution. By the obtained results was possible to conclude that the use of FDR technique, by the Diviner 2000 probe, showed appropriate for the obtaining values of soil moisture, presenting as advantage the speed and precision in readings obtaining. The fertigation by drip irrigation in high application rates promotes the ions displacement in depth (soil profile), could be observed that this effect was more intensified in sandy soil texture, due to present smaller interaction with the nitrate and potassium ions in the soil solution.

Keywords: Fertigation; Ions Distribution; Nitrate; Potassium; Diviner Probe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da instalação do projeto: preenchimento com brita (a) e colocação da manta Bidim (b), instalação do tubo de acesso para a sonda Diviner (c) e bombonas preenchidas com os diferentes tipos de solo (d).....	31
Figura 2 - Sistema de irrigação, montado sobre as bombonas, para aplicação de fertilizantes (a) e (b).....	32
Figura 3 - Coleta de amostras de solo para determinação umidade pelo método gravimétrico (a) e (b).	33
Figura 4 - Disposição das bombonas de solo na casa de vegetação e distribuição dos tratamentos.....	35
Figura 5 - Reservatório de PVC para prepara da solução fertilizante (a) e sistema de distribuição (b).....	36
Figura 6 - Bomba hidráulica centrífuga (a) e painel eletrônico para controle do tempo de irrigação (b).	36
Figura 7 - Aparelhos utilizados para análises químicas, fotômetro de chama (a) e Espectrofotômetro de ultra violeta – Colorímetro (b)	39
Figura 8 - Curvas de calibração obtidas para o solo arenoso (a) e solo para o solo argiloso (b).....	43
Figura 9 - Distribuição espacial da água nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009	46
Figura 10 - Distribuição espacial do íon nitrato nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009.....	50
Figura 11 - Distribuição espacial do íon potássio nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009.....	54
Figura 12 - Distribuição espacial do pH nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009	57
Figura 13 - Distribuição espacial da CE nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da análise granulométrica dos solos utilizados no experimento...	30
Tabela 2 - Concentração e consumo da solução fertilizante, por tratamento, em cada fertirrigação.....	37
Tabela 3 - Distribuição dos graus de liberdade para as diferentes fontes de variação ..	41
Tabela 4 - Análise dos efeitos do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a umidade do solo (θ_v), potencial de hidrogênio (pH), condutividade elétrica (CE), concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) e concentração de potássio ($[\text{K}^+]$) na solução do solo1	41
Tabela 5 - Umidade gravimétrica e frequência relativa encontrada para os pontos utilizados na calibração da sonda Diviner 2000.....	42
Tabela 6 - Níveis de significância para os efeitos da textura do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a distribuição da água no perfil do solo	44
Tabela 7 - Médias dos valores de umidade (θ_v) nos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h ⁻¹ , de janeiro a março de 20091	47
Tabela 8 - Níveis de significância para os efeitos da textura do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a distribuição do íon nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) no perfil do solo.....	48
Tabela 9 - Médias dos valores de concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) na solução dos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h ⁻¹ , de janeiro a março de 20091.....	51
Tabela 10 - Níveis de significância para os efeitos da textura do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a distribuição do íon potássio ($[\text{K}^+]$) no perfil do solo.....	51

Tabela 11 - Médias dos valores de concentração de potássio ($[K^+]$) na solução dos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h ⁻¹ , de janeiro a março de 20091.....	53
Tabela 12 - Níveis de significância para os efeitos de solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre o potencial de hidrogênio na solução do solo.....	55
Tabela 13 - Médias dos valores de potencial de hidrogênio (pH) nos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h ⁻¹ , de janeiro a março de 20091.....	58
Tabela 14 - Níveis de significância para os efeitos de solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a condutividade elétrica (CE) da solução do solo.....	59
Tabela 15 - Médias dos valores de condutividade elétrica (CE) nos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h ⁻¹ , de janeiro a março de 20091.....	62

1 INTRODUÇÃO

O suprimento de água é um dos principais fatores que influenciam e geralmente restringem o crescimento das plantas. A forma com que é fornecida via irrigação, é de grande importância porque pode afetar o suprimento de água e nutrientes (MEDEIROS et al., 2007).

No Brasil, todos os métodos de irrigação (superfície, aspersão e microirrigação) têm sido utilizados; no entanto, os sistemas de irrigação localizada como gotejamento e microaspersão são os que mais proliferam em todo o mundo. Muitos agricultores irrigantes optam por este tipo de projeto, buscando economia de água, energia elétrica e mão-de-obra.

O principal problema encontrado nesse sistema de irrigação é o fato da fração de área molhada ser reduzida; cuja característica, pode vir a trazer inúmeras peculiaridades ainda pouco estudadas. Em alguns casos podem não atender às exigências hídricas de plantas adultas nos primeiros anos de implantação do projeto ou ainda promover a ocorrência freqüente de problemas de manejo como a acidificação intensa do bulbo molhado, ocasionada pelo uso da fertirrigação.

A fertirrigação, que consiste na aplicação dos fertilizantes juntamente com a água de irrigação, apresenta-se como uma ferramenta poderosa para redução de custos de produção e aumento na eficiência de utilização de fertilizantes; porém, quando mal manejada, além de criar condições químicas de solo desfavoráveis, devido à aplicação localizada, resulta na perda de nutrientes pela erosão hídrica, com conseqüente aumento no custo de produção e na contaminação ambiental, comprometendo a qualidade das águas. Segundo Duenhas et al. (2002), esta contaminação é expressa, em geral, em aumento na salinidade e na concentração de nitrato, que é um poluente mineral comum das águas subterrâneas em áreas agrícolas.

Se o excesso de nitrato na solução do solo persistir no intervalo entre cultivos, também pode produzir lixiviação com a água das chuvas (ARAUZO, 2003). O resultado é que, cada vez com mais freqüência, se alcançam concentrações que podem afetar a saúde humana (contaminação de águas de abastecimento) e a qualidade ambiental (processos de eutrofização em ecossistemas aquáticos).

O monitoramento destas concentrações exige determinações constantes e a frequência destas determinações pode ser elevada se o ciclo da cultura for curto; assim sendo, a utilização de extratores de solução do solo surge como uma alternativa viável.

Portanto, o desafio na busca por melhores práticas de manejo para fazer os cultivos mais eficientes e reduzir o impacto sobre as águas superficiais e subterrâneas requer grande conhecimento dos fatores que afetam a dinâmica da água e de solutos no solo.

Entre as técnicas para monitorar a dinâmica da água e de solutos no solo, pode-se citar o uso de extratores de cápsula porosa na determinação e monitoramento da concentração iônica, que apresenta algumas características: a quantidade de íons na solução extraída pelos extratores é mais próxima da quantidade na solução do solo que é absorvida pela planta e os solutos dissolvidos serão aproximadamente os mesmos; a amostragem é sistemática, sempre no mesmo ponto e não destrutiva; a aferição da condutividade é praticamente instantânea (SILVA, 2002).

Na verdade, vários são os métodos, dos quais o produtor pode dispor, para monitorar o conteúdo de água no solo e manejar a irrigação. Dentre esses, as sondas de capacitância (EnviroScan e Diviner 2000), apesar de pouco utilizadas no Brasil, são alternativas aos métodos tradicionais de quantificação do teor de água do solo.

Porém observa-se um aumento da utilização de equipamentos baseados na Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) e após a instalação dos tubos de acesso e sua calibração em função do tipo de solo, apresentam certas características: leituras rápidas dos valores de umidade do solo, amostragem não destrutiva e em profundidade no perfil de solo e permite o monitoramento da umidade do solo ao longo do tempo.

Portanto, diante do exposto, objetivou-se por meio da utilização de extratores de cápsula porosa e sonda de capacitância 'Diviner 2000', conhecer o processo de redistribuição da água aplicada por um sistema de gotejamento em dois solos distintos (arenoso e argiloso), buscando apontar vantagens e desvantagens da utilização da sonda; bem como, avaliar o efeito de diferentes cenários hídricos sobre a distribuição dos íons nitrato e potássio no solo, fornecendo assim, um embasamento para práticas de manejo da fertirrigação que utiliza este sistema.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Considerações iniciais

2.1.1 Irrigação e fertirrigação

Um dos aspectos mais importantes da irrigação é a reposição da água ao solo em quantidade adequada e na ocasião oportuna. O excesso da irrigação geralmente reduz a produtividade e a qualidade da produção, podendo provocar o crescimento excessivo da planta, o retardamento da maturação dos frutos, a lixiviação dos nutrientes solúveis, queda de flores, maior ocorrência de doenças e distúrbios fisiológicos, maiores gastos com energia e o desgaste do sistema de irrigação (FOLEGATTI et al, 2003).

O conhecimento detalhado do comportamento da água, durante o desenvolvimento de uma cultura, fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visem à otimização da produtividade (ROCHA et al. 2004).

A irrigação, além de constituir uma alternativa de melhoria na produção, também pode ser utilizada para a aplicação de fertilizantes no solo (fertirrigação), que vem sendo utilizada com muita frequência no cultivo de frutíferas, principalmente fazendo uso da irrigação por gotejamento.

Sob esse aspecto, sabe-se que a continuada utilização dos recursos solo e água têm levado a uma crescente degradação dos ecossistemas agrícolas tornando, cada vez mais, o recurso água um bem escasso e caro, havendo por isso constante preocupação em aumentar a eficiência do uso da água (GUERREIRO et al, 2005).

A água é o elemento fundamental para o desenvolvimento das plantas. A extensão de seu efeito no crescimento das raízes e da planta como um todo depende de como é aplicada, da permeabilidade do solo regularmente umedecido, das condições físicas relacionadas ao movimento da água para a planta, além da interação entre estes fatores e a necessidade hídrica da planta nos diferentes estádios fenológicos (MARSH, 1968).

Os sistemas de irrigação localizada como gotejamento e microaspersão são os que mais proliferam em todo o mundo. Entre as vantagens desse método, inclui-se a

alta eficiência de aplicação, baixa pressão, facilidade de operação e bom controle sobre a umidade e aeração do solo. A área molhada (Pm) sob irrigação, nesse caso deve estar entre 33 e 67%, sendo que, em regiões de precipitação considerável (acima de 1200 mm), os valores de Pm inferiores a 33% são aceitáveis para solos de textura média a fina, ou seja, solos siltosos e argilosos. Por outro lado, a Pm deve ser mantida inferior a 67% de forma a evitar umedecimento desnecessário entre as linhas de plantio, facilitando, portanto as práticas culturais (COELHO et al, 2004).

A porcentagem de área molhada e o perfil de molhamento do solo variam em função do tipo de solo, do tipo de emissor, do espaçamento entre emissores e da vazão dos emissores (VERMEIREM e JOBLING, 1980; KELLER e KARMELI, 1975), do tempo de aplicação de água e da lâmina de água aplicada (Bernardo, 1995).

A irrigação localizada, tanto por microaspersão quanto por gotejamento vem sendo bastante utilizada com intuito de reduzir o volume de água aplicado e maximizar a eficiência do uso de recursos hídricos; entretanto, é o manejo adequado que irá proporcionar melhor eficiência da irrigação. Segundo Fernandes (1998), a eficiência de um sistema de irrigação está intimamente ligada ao seu manejo, que deve considerar aspectos econômicos, sociais e ecológicos. O manejo deficiente e a falta de drenagem tem sido a principal causa do baixo desempenho da maioria dos projetos de irrigação no Brasil.

A irrigação de pomares com gotejadores é uma prática em expansão em todo mundo. Muitos agricultores irrigantes optam por este tipo de projeto, buscando economia de água, energia elétrica e mão-de-obra; sendo que o principal problema encontrado nesse sistema de irrigação é o fato da fração de área molhada ser reduzida.

O molhamento de uma fração reduzida do solo, ocasionado pela irrigação localizada, tem apresentado inúmeras vantagens em relação a outros sistemas, dentre eles a economia de uma quantidade significativa de água; no entanto, esta característica traz inúmeras peculiaridades ainda pouco estudadas. Tem-se verificado a ocorrência freqüente de problemas de manejo de pomares irrigados por gotejamento, dentre eles a acidificação intensa do bulbo molhado, ocasionada pela fertirrigação.

Entre as inúmeras vantagens do emprego racional da irrigação, pode-se citar o emprego da fertirrigação, que facilita e diminui os custos da aplicação de corretivos e fertilizantes hidrossolúveis; etc.

A fertirrigação consiste na aplicação dos adubos juntamente com a água de irrigação. Tal operação, além de ser de grande utilidade para as plantas, pois o nutriente é fornecido juntamente com a água (essencial para sua absorção), apresenta ainda muitas outras vantagens, entre as quais a de melhor distribuição do fertilizante no campo e a possibilidade de maior parcelamento das adubações, aumentando a eficiência na utilização dos adubos pelas plantas (DUENHAS et al. 2002).

A fertirrigação objetiva o uso racional dos fertilizantes na agricultura irrigada; Porém, quando mal manejada, resulta na perda de nutrientes pela erosão hídrica, com conseqüente aumento no custo de produção e na contaminação ambiental, comprometendo a qualidade das águas. Segundo Duenhas et al. (2002), esta contaminação é expressa, em geral, em aumento na salinidade e na concentração de nitrato, que é um poluente mineral comum das águas subterrâneas em áreas agrícolas.

2.1.2 Técnicas de monitoramento da umidade e solutos no solo

O monitoramento da umidade do solo tem sido uma prática cada vez mais importante nas atividades agrícolas, tanto pelo fato de lidar com a parte de racionalização do uso da água, bem como, economia com gastos de energia elétrica, e prevenção de doenças em plantas.

São vários os métodos para determinação da umidade do solo, como o gravimétrico, considerado o método direto padrão, além de métodos indiretos, tais como sonda de nêutrons, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e Reflectometria no Domínio da Freqüência (FDR).

No método gravimétrico a amostra de solo é coletada com trado ou simplesmente cavando-se o solo é pesada quando úmida e pesada novamente após permanecer em estufa a 105-110 °C até adquirir peso constante. Uma alternativa para estufa é a utilização de forno de microondas (KLUTE, 1986). A secagem em estufa ou microondas remove a água “retida” entre as partículas do solo, mas não remove a água

estrutural, presa na matriz das argilas. A diferença de peso entre o solo úmido e seco é a massa de água existente na amostra do solo.

A sonda de nêutrons emprega fontes radioativas (Amerício e Berilo) para emitir nêutrons rápidos que, após termalizados pelos átomos de hidrogênio da água no solo, são contados por um detector. É um método que vem sendo utilizado há muitos anos, mas tende a cair em desuso devido aos potenciais problemas causados pela emissão de nêutrons e de radiação durante a sua operação. A sua resolução espacial é relativamente pobre, mas a resolução temporal é razoável e por isso tem sido utilizada em estudos de dinâmica de água no solo (REICHARDT, 1996). A utilização da sonda de nêutrons para manejo da irrigação tem sido muito limitada ou quase inexistente no Brasil. O equipamento requer calibração específica para o local de medição da umidade e a coleta automática de dados é possível em um único ponto de amostragem, o que limita ainda mais a sua utilização.

A técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) vem se apresentando como promissora nos trabalhos de medida de umidade no campo. Trata-se de uma técnica não destrutiva, baseada na transmissão e recepção de sinais de microondas, através de “antenas” ou sondas instaladas no solo. No solo seco os valores da constante dielétrica são tipicamente na faixa de 3 a 5. Na água este valor está em torno de 80. Assim sendo, pequenas quantidades de água são capazes de afetar extremamente o valor da medida de condutividade elétrica no solo (HERMANN, 1993).

Tal técnica é altamente sensível às variações da umidade do solo, permitindo a coleta automática de dados e a automação de operações da irrigação. Esta técnica apresenta as seguintes vantagens: i) técnica não destrutiva; ii) não utiliza radiação ionizante; c) alta exatidão na medida do conteúdo de água; iii) baixo custo no acoplamento a um coletor de dados; iv) portabilidade; v) medidas podem ser realizadas tanto no perfil horizontal como no perfil vertical no solo; vi) medidas podem ser feitas em campo, sem causar distúrbios no solo. Entretanto, encontram-se, também, algumas desvantagens do uso da técnica TDR, podendo ser destacadas: i) influência da salinidade nas medidas de umidade volumétrica; ii) influência dos óxidos de ferro no processo de leitura, através da permeabilidade característica de cada óxido; iii) dependência do tipo de solo, isto é, a dependência de solos minerais e solos

inorgânicos na calibração; iv) variações significativas da densidade global do solo, em particular em solos expansivos, provocam considerável mudança na leitura do conteúdo em água; v) custo relativamente elevado para ser empregado em área de produtores e de requerer a instalação das guias de onda em trincheiras quando se quer realizar medições em profundidades maiores no perfil do solo (FARIA et al., 1998).

Como foi dito anteriormente, a fertirrigação objetiva o uso racional de fertilizantes, mas quando mal planejada pode resultar em perdas de nutrientes que podem vir a provocar algum dano em termos de contaminação ambiental, comprometendo a qualidade das águas.

Meurer et al. (2000) destacam como contaminantes de águas superficiais e subterrâneas, o fosfato e o nitrato, respectivamente. Esses elementos, conforme Resende et al. (2002), têm gerado, nos últimos anos, grande preocupação acerca dos efeitos, principalmente do nitrato, na saúde da população humana e animal.

A contaminação de aquíferos por nitrato está se estabelecendo por muitas razões, principalmente devido ao acréscimo do uso de fertilizantes inorgânicos na agricultura e a disposição de material orgânico sobre e abaixo da superfície agricultável (MIRANDA, 2001). Na Austrália, elevadas concentrações de nitrato em águas subterrâneas têm sido identificadas em todos os estados e territórios sob diferentes usos de solo. Thorburn et al. (2003) verificaram elevadas concentrações de nitrato na água subterrânea da costa noroeste da Austrália, além da salinidade acima do limite recomendável; e, verificaram que nesta região uma das maiores fontes de contaminação era a utilização de fertilizantes minerais.

O desafio das melhores práticas de manejo para fazer os cultivos mais eficientes e reduzir o impacto sobre as águas superficiais e subterrâneas requer grande conhecimento dos fatores que afetam a dinâmica da água no solo. Para minimizar a lixiviação de nitratos é necessário otimizar as doses de fertilizantes nitrogenados e o seu manejo (DÍEZ et al. 2000), ao passo que se aplicam lâminas otimizadas de irrigação, as quais podem ser conseguidas mediante o uso de sistemas de determinação das variações das reservas de água na zona saturada. E se possível, realizar estas medidas sem causar distúrbios de mudança de estrutura do solo.

Sendo assim, o monitoramento destas concentrações exige determinações constantes e a frequência destas determinações pode ser elevada se o ciclo da cultura for curto, assim sendo, a utilização de extratores de solução do solo surge como uma alternativa viável. Várias vantagens podem ser relacionadas ao uso dos extratores de cápsula porosa na determinação e monitoramento da concentração iônica: a quantidade de íons na solução extraída pelos extratores é mais próxima da quantidade na solução do solo que é absorvida pela planta e os solutos dissolvidos serão aproximadamente os mesmos; a amostragem é sistemática, sempre no mesmo ponto e não destrutiva; a aferição da condutividade é praticamente instantânea (SILVA, 2002).

Segundo Arauzo (2003), se o excesso de nitrato na solução do solo persistir no intervalo entre cultivos, também pode produzir lixiviação com a água das chuvas. O resultado é que, cada vez com mais frequência, se alcançam concentrações que podem afetar a saúde humana (contaminação de águas de abastecimento) e a qualidade ambiental (processos de eutrofização em ecossistemas aquáticos).

É sabido também que em termos de monitoramento de solutos, cabe ressaltar a existência de vários modelos teóricos desenvolvidos ao longo dos anos para descrever o transporte de produtos químicos nos solos. O sucesso desses modelos depende em larga escala da habilidade em quantificar os parâmetros de entrada. Parâmetros importantes são: (i) fluxo de fluidos; (ii) coeficiente de dispersão; (iii) coeficientes de adsorção ou troca, no caso das interações entre esses produtos químicos e a fase sólida (VAN GENUCHTEN e WIERENGA, 1986). Coeficientes simples e lineares de adsorção podem ser contabilizados pela introdução de um fator de retardamento na equação de transporte. Vários coeficientes de zero ou primeira ordem, de produção ou decomposição podem ser requeridos.

Um grande número de métodos para a determinação do coeficiente de dispersão e o fator de retardamento, a partir de valores observados para a distribuição da concentração de solutos, encontram-se disponíveis. Entre as técnicas que são aplicáveis em experimentos de laboratório e campo para deslocamentos de solutos podemos citar: (i) tentativa e erro; (ii) pela declividade da curva de efluente; (iii) gráfico log-normal da curva de efluente; (iv) análise dos mínimos quadrados da curva de

efluente; (v) mediante as curvas concentração versus distância (VAN GENUCHTEN e WIERENGA, 1986).

Entre os vários métodos para se determinar o coeficiente de difusão (D) e o fator de retardamento (R), os dois métodos mais simples (i) e (ii) são provavelmente os mais apropriados quando a curva do efluente é pobremente definida. Isto pode ser devido a um número limitado de dados ou determinações imprecisas, à dispersão entre os pontos observados ou a grandes desvios das curvas sigmodais típicas desse tipo de estudo. Os métodos nas técnicas dos mínimos quadrados e nos gráficos log-normal são mais indicados para os casos em que a curva experimental é bem definida. Dos métodos existentes, os dos mínimos quadrados computacionais são os mais acurados e, ao mesmo tempo, os mais convenientes para serem usados. Portanto, são os mais recomendados caso exista facilidade de computação (FERREIRA e MARTINEZ, 1997).

2.1.3 Uso de extratores de cápsula porosa para extração da solução do solo

O uso de fertilizantes em excesso, via água de irrigação, eleva os níveis de salinidade do solo, ao ponto de superar os limites de tolerância pela maioria das culturas, refletindo-se na diminuição do rendimento. Desta forma, a prática da fertirrigação, embora contribua de maneira significativa para o aumento da produtividade, em determinadas situações, sobretudo na irrigação por gotejamento, pode também resultar no acúmulo do teor salino no solo.

O molhamento de uma fração reduzida do solo, ocasionado pela irrigação localizada, tem apresentado inúmeras vantagens em relação a outros sistemas, dentre eles a economia de uma quantidade significativa de água; no entanto, esta característica traz inúmeras peculiaridades ainda pouco estudadas. Tem-se verificado a ocorrência freqüente de problemas de manejo de pomares irrigados por gotejamento, dentre eles a acidificação intensa do bulbo molhado, ocasionada pela fertirrigação.

Com isso, a qualidade da água fornecida às plantas tornou-se uma grande preocupação na irrigação; uma vez que as águas contêm sais que podem dissolver acumulando-se paulatinamente na zona radicular e acelerando a sua escassez de água. Essa salinização do solo muitas vezes torna-se inevitável, à medida que a água se transfere para a atmosfera, por evapotranspiração.

O excesso de sais no solo, além de reduzir a disponibilidade de água às plantas, pode exercer efeitos tóxicos de íons específicos sobre os seus processos fisiológicos e metabólicos, comprometendo o rendimento e a qualidade da produção.

A salinização provocada pela água de irrigação, conhecida por salinização secundária, pode ser monitorada a partir da utilização de alguns instrumentos. Em campo, vários são os métodos disponíveis para determinar a condutividade elétrica (CE) e avaliar a salinidade do solo, tais como a técnica de indução eletromagnética, “four-elektrodes probe”, “time domain reflectometry-TDR”, (RHOADES, 1994), além do uso de extratores de solução. Cada um dos métodos apresentou vantagens e desvantagens, sendo o uso de extratores de cápsula porosa um dos mais preconizados atualmente.

O uso dessa metodologia já é bastante popular entre pesquisadores por apresentar resultados satisfatórios a um custo relativamente baixo. Silva (2002), concluiu que, com o auxílio dos extratores de solução providos de cápsulas de cerâmica, é possível determinar a concentração de nitrato e potássio com excelente precisão na solução do solo e a determinação da concentração de cálcio e magnésio, com uma menor precisão.

Um aspecto a ser observado é que a utilização do método da medição da condutividade elétrica da solução obtida com extrator de cápsula porosa é bastante eficiente, devido a sua facilidade, versatilidade e praticidade, quando comparada com o da solução diluída 1:2, desde que sejam conhecidas a umidade da pasta e a umidade no momento da extração (SILVA et al., 1999).

2.1.4 Uso da Sonda Diviner 2000 para monitoramento da umidade no solo

O conceito de disponibilidade de água no solo para as plantas baseia-se em sua mobilidade. Quando a demanda de água da planta e da atmosfera é suprida pela intensidade de fluxo de água do solo para a raiz, diz-se que a água está disponível para a planta (REICHARDT, 1985).

Um bom manejo de irrigação se baseia em otimizar a distribuição espacial e temporal da água aplicada com objetivo de incrementar a produtividade e qualidade dos cultivos e em conseqüência obter o máximo retorno econômico. (DÍEZ et al, 2005). As

boas práticas de irrigação objetivam manter um nível adequado da umidade na zona radicular e minimizar a contaminação difusa, ou seja, a lixiviação de água e nutrientes por baixo da zona radicular. (FARES et al. 2000 citado por DÍEZ et al, 2005).

Vários são os métodos dos quais o produtor pode dispor para manejar a irrigação, podendo ser classificados em: a) métodos baseados na planta; c) métodos baseados no balanço de água no solo; d) evaporímetros e e) informações meteorológicas. Dentre aqueles baseados no balanço de água no solo, as sondas de capacitância (EnviroScan e Diviner 2000), apesar de pouco utilizadas no Brasil, são alternativas aos métodos tradicionais de quantificação do teor de água do solo.

Dentre os métodos para manejo de irrigação disponíveis, aqueles que se fundamentam na avaliação da umidade volumétrica, ou por umidade de matéria seca do solo, como os métodos tensiométricos, são os de aplicação mais direta e fácil operação. Porém, são métodos que exigem amostragem em vários pontos e também em profundidades adequadas.

A Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) nos traz facilidades para tal mensuração, ou seja, estimar o conteúdo de água no solo, e há sensores de capacitância, comercialmente disponíveis, como o “Diviner 2000” e o “EnviroScan”, que tem sido testados e utilizados em muitos trabalhos que necessitam do monitoramento da umidade do solo com precisão (FARES e ALVA, 1999; GIRONA et al., 2002). Essas sondas estão sendo utilizadas para auxiliar no monitoramento da água do solo e/ou manejo de irrigação e apresentam como principais vantagens, segurança ao operador em virtude de não estar próximo à fonte radioativa, como as sondas de nêutrons; o fornecimento de leituras rápidas e precisas em profundidade; facilidade de operação e permitem, ainda, o acoplamento em sistemas automáticos de coleta de dados (GARDNER et al., 1991).

A sonda consiste de um display coletor de dados (datalogger) acoplado, via cabo, a um sensor, que ao ser inserido em um tubo de PVC (tubo de acesso) instalado no solo, provê automaticamente leituras do conteúdo da água, com base na medida da constante dielétrica ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo), obtida por meio da frequência de ondas eletromagnéticas, que atravessam o volume de solo.

A frequência de oscilação (MHz) é armazenada pelo datalogger durante um tempo fixo (1s), resultando em uma contagem que pode variar entre 120.000 e 160.000, dependendo das condições de umidade do solo. Uma vez que não há exatidão nos valores de frequência (F) nas leituras realizadas por sondas diferentes, dada uma condição particular como, por exemplo, água e o ar, o fabricante (SENTEK, 2000) optou por fazer uma normalização das medidas; para isto, primeiro deve-se registrar as leituras dentro de um tubo de PVC exposto, separadamente, ao ar e a água (26°C).

O método baseia-se na medição da constante dielétrica ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo), a qual é relacionada com a umidade volumétrica (θ) (SILVA et al., 2007).

A conversão do sinal de frequência em conteúdo volumétrico de água no solo (θ) é obtida mediante uma equação de calibração previamente ajustada. De posse da equação, ajustada para as condições locais de solo, as constantes A, B e C devem ser inseridas na equação armazenada no datalogger.

A calibração de instrumentos medidores é basicamente feita por uma comparação das leituras desse instrumento com valores determinado por um método que foi estabelecido e aceito como um método padrão para mensuração desses valores. Quando tais valores são plotados em um gráfico, eles constituem uma relação que é descrita por uma equação matemática. Dessa forma, os diferentes níveis de umidade enviados pelo sensor são diretamente relacionados com os valores reais determinados no solo (SENTEK, 2000).

A sonda portátil “Diviner 2000” é inserida em tubos de acesso no chão, sendo instalada com o mínimo de perturbação do perfil do solo. O sensor, que oferece uma precisão de cerca de 1% de percentagem de água volumétrica no solo, usa a capacitância elétrica para medir a umidade do solo. É criado um campo elétrico de alta frequência ao redor de cada sensor, partindo do tubo de acesso e penetrando pelo solo. A frequência medida é uma função da quantidade de água existente no solo (SENTEK, 2000).

2.1.5 Transporte do íon nitrato no solo

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, se movendo com outros sais solúveis para frente de molhamento (LELIS NETO, 2008). Assim sendo, essa dinâmica do nitrogênio (N) no solo envolve processos de natureza física, química e biológica, que determinarão se o N permanecerá adsorvido na camada agricultável do solo, absorvido pelas plantas ou se moverá no solo, até atingir camadas mais profundas. O movimento e o destino desses produtos no ambiente são influenciados por processos de retenção (adsorção e absorção), de transporte (lixiviação, volatilização, escoamento superficial), de transformação biológica e pela interação desses processos (SPADOTTO, 2003).

O nitrato pode alcançar os lençóis freáticos e cursos de água, causando enfermidades pelo consumo de água contaminada (cianose infantil ou metaemoglobinemia e câncer no estômago) e danos ambientais, tais como a eutrofização (BURT, 1993). Quanto à mobilidade do solo, pode-se dizer que o fluxo de massa (advecção) é o único responsável pelo seu movimento no perfil do solo, dependendo estritamente do fluxo de água que arrasta os nutrientes (PADOVESE, 1988). Desse modo, o movimento desse íon no solo será afetado diretamente pelos fatores que modificam o movimento da água no solo, como a porosidade e a estrutura.

O conteúdo de nitrato presente no solo pode variar com a sazonalidade de variáveis ambientais como a temperatura e a precipitação que acabam influenciando o processo de assimilação, o consumo e o armazenamento desse íon pelas plantas. O comportamento da distribuição temporal do nitrato no solo sob a forma de pulsos tem sido relatado para diversos ecossistemas, entretanto, sua influência nos processos ecológicos e a definição das estratégias de aquisição e de uso desse íon pelas plantas tropicais ainda são incipientes.

Segundo Newbould (1989) o consumo de fertilizantes nitrogenados tem aumentado em escala global. As fontes de nitrogênio rapidamente disponíveis são sais inorgânicos de amônio, nitrato e uréia.

Segundo Lelis Neto (2008), para prevenir e minimizar a poluição de águas subterrâneas com nitrato é necessário um controle das taxas de nitrogênio aplicadas anualmente ao solo, além da compreensão dos fatores intervenientes na mobilidade do ânion no solo. As formas nítricas, quando aplicadas diretamente na formulação de fertilizantes ou produzidas por nitrificação do amônio, são rapidamente solúveis na solução do solo. Esta alta solubilidade e a fraca interação com a matriz do solo possibilitam que o ânion acompanhe a frente de umedecimento da água no solo; assim, o nitrato tanto pode movimentar-se para baixo, sob condições de excessiva precipitação ou irrigação, quanto para cima, por capilaridade, durante estações extremamente secas. A textura do solo e o conteúdo de matéria orgânica têm maior influência nas perdas por lixiviação. Solos de textura mais grosseira e de baixo conteúdo de matéria orgânica tendem a permitir maiores perdas de nitrato por lixiviação, enquanto as menores perdas devem ocorrer em solos argilosos (MUCHOVEJ & RECHCIGL, 1994).

Exner et. al. (1991) verificaram movimento profundo de nitrato, em diferentes taxas de aplicação, sob condição de irrigação, cujos resultados indicaram que 95% do nitrato aplicado foram lixiviados para baixo da zona radicular da cultura, sendo que as concentrações médias de nitrato no pulso variaram de 34 a 70 mg L⁻¹ de nitrato.

Na Europa e nos Estados Unidos, áreas com concentrações de nitrato, na solução do solo, acima de 50 mg L⁻¹ podem ser consideradas potencialmente poluídas (VANCLOOSTER; VIAENE; CHRISTIAENS, 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) citado por Lelis Neto (2008) afirmam que, mesmo quando esses valores estão acima de 10 mg L⁻¹, já provocam problemas de saúde em crianças; desta forma, é importante que se disponha de informações a respeito dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem durante a lixiviação, trocas iônicas e adsorção desses íons favorecendo a compreensão de como ocorre sua movimentação no solo.

2.1.6 Transporte do íon potássio no solo

O potássio é o segundo elemento mais absorvido pela planta. Este nutriente tem a função de ativador enzimático e, uma vez absorvido, pode ser transferido das partes mais velhas para as partes mais novas, sendo considerável móvel na planta, ao contrário do cálcio, que é imóvel.

Segundo Malavolta (1980) é um macronutriente absorvido da solução do solo pelas raízes, predominando o contato pelo processo de difusão. É absorvido pelas raízes na forma de K^+ e desempenha várias funções na planta e, dentre estas, pode-se citar a melhor eficiência de uso da água, em consequência do controle da abertura e fechamento dos estômatos, maior translocação de carboidratos produzidos nas folhas para outros órgãos da planta, maior eficiência enzimática e melhoria da qualidade comercial da planta (MALAVOLTA, 1997).

Trata-se, portanto, de um íon que é exigido em grandes quantidades na época de florescimento e penetração do ginóforo, sendo que sua deficiência pode provocar formação de vagens com apenas uma semente. Melhora a resistência da planta à seca ou a períodos de veranico, podendo estar envolvido na resistência a doenças fúngicas (CÂMARA et al., 1982).

Também é requerido para a síntese protéica em plantas e exerce importantes funções reguladoras, participando na ativação de enzimas e no processo fotossintético em vários níveis (GIANELLO et al., 1995). Quando deficientes essas apresentam menor síntese de proteínas e acúmulo de compostos nitrogenados solúveis, como aminoácidos, amidas e nitrato (FAQUIN, 1994).

Por ser um nutriente móvel, pode ser facilmente perdido ao longo do perfil do solo, sendo necessárias aplicações freqüentes desse elemento. No Brasil, a aplicação de potássio às culturas é feita quase totalmente no plantio e/ou cobertura em aplicação direta ao solo. Algumas vezes a aplicação é complementada com adubações foliares (ZANINI, 1991).

Os mecanismos que controlam o transporte de potássio no solo são baseados na rápida troca com outros cátions no solo. Quando a quantidade de potássio no solo é relativamente pequena com relação à capacidade de troca de cátions, a adsorção é controlada principalmente pelas variações da concentração de potássio na solução do

solo. Quando a concentração de potássio na solução do solo aumenta, a capacidade tampão do potássio decresce e a velocidade de transporte do potássio se incrementa. No período de máxima taxa de absorção de potássio pela planta, com alta demanda de potássio, este elemento deve ser suprido pela água de irrigação até que a concentração no solo seja suficiente (BAR-YOSEF, 2000).

Segundo Scaloppi e Brito (1986), o potássio solúvel ou trocável geralmente representa uma pequena proporção, mas, ocasionalmente, pode estar incluído entre os principais constituintes da salinidade do solo. Cloreto, sulfato e, menos freqüentemente, nitrato, e pequenas quantidades de bicarbonatos, representam os ânions principais. Além dos sais solúveis, os solos salinos podem conter sais de menor solubilidade, como sulfato de cálcio (gesso) e carbonatos de cálcio e magnésio (calcário). Pelo fato dos colóides estarem floculados, a permeabilidade é igual ou superior a dos solos similares, não salinos.

Por outro lado, a fertilização com potássio quando adicionado via água de irrigação, geralmente não causa qualquer reação química adversa nas tubulações e emissores, mas pode causar precipitação de sais insolúveis se são misturados com outros fertilizantes. Por exemplo, se o nitrato de cálcio é misturado com sulfato de potássio, pode resultar em um sulfato de cálcio insolúvel (ROLSTON et al., 1986).

Sparks e Huang (1985), citados por Lelis Neto (2008), indicam que o potássio do solo pode ser lixiviado, adsorvido pelo solo ou absorvido pela planta. Os fatores que influenciam no movimento do potássio no solo são: a condutividade hidráulica, o pH do solo, o método e a taxa de aplicação deste elemento, a umidade do solo e a absorção pela planta. A habilidade do solo em reter o potássio aplicado é muito dependente da capacidade de troca de cátions do solo, assim, as quantidades de argila e matéria orgânica no solo, influenciam, fortemente, no grau de lixiviação.

Os solos com alta capacidade de troca têm grande habilidade em reter o potássio aplicado; entretanto, a lavagem deste elemento é freqüentemente um problema em solos arenosos.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Localização e caracterização experimental

O experimento foi instalado em uma casa de vegetação com dimensões de 15 m de comprimento e 5 m de largura (estrutura metálica galvanizada e cobertura em polietileno transparente com espessura de 0,10 mm), pertencente à área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, situada no município de Piracicaba – SP (22° 43’ 33” de latitude sul e 47° 38’ 00” de longitude oeste, com 511 m de altitude).

A estrutura era provida de energia elétrica e de água potável, oriunda do próprio sistema de abastecimento de água do campus da ESALQ/USP.

2.2.2 Instalação do experimento

Na casa de vegetação foram distribuídas 18 bombonas plásticas medindo cada uma, 0,6 e 0,8 m de diâmetro e altura, respectivamente, as quais foram posteriormente preenchidas, de forma inteiramente casualizada, com dois solos de texturas distintas, classificados como: Latossolo Vermelho Amarelo, fase arenosa, denominado Série “Sertãozinho” (solo arenoso) e Terra Rocha Estruturada, fase argilosa, denominado Série “Luiz de Queiroz” (solo argiloso), conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, EMBRAPA (1999).

Ao fundo de cada bombona e com auxílio de uma furadeira elétrica, foram feitos 9 furos de 8 mm, os quais tiveram como finalidade permitir a drenagem no solo quando o volume de água aplicado excedia a capacidade de armazenamento de cada solo.

Para deixar os drenos livres e tornar possível a observação da ocorrência de drenagem durante os ensaios, as bombonas foram posicionadas sobre uma camada de tijolos que também auxiliaram no nivelamento das mesmas sobre o piso da casa de vegetação.

Uma camada de 0,1 m de pedra brita sob uma manta de tecido Bidim, foi adicionada à parte inferior interna de cada bombona, como forma de evitar a obstrução dos drenos, garantindo o funcionamento dos mesmos.

Em seguida, procedeu-se o preenchimento com os solos, que foram previamente destorroados e peneirados em peneira de malha 0,005 x 0,005 m. Nesta fase, foram coletadas amostras para o procedimento da análise granulométrica, no Laboratório Agrotécnico de Piracicaba (PIRASOLO), para os dois tipos de solo (Tabela 1).

Tabela 1 - Resultado da análise granulométrica dos solos utilizados no experimento

Solo	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
	<0,002mm	0,053-0,002mm		2,00-0,210mm	0,210-0,053mm
	-----g/kg-----				
Arenoso	203	27	770	380	390
Argiloso	381	209	410	170	240

Durante o preenchimento das bombonas, cada solo foi pesado e acondicionado em camadas individuais de 0,1 m, de forma que ao final do preenchimento obtivesse uniformidade de densidade nas bombonas que receberam o mesmo tipo de solo.

Após o preenchimento das bombonas, todas elas, receberam sucessivas irrigações a fim de auxiliar o processo de acomodação/reestruturação do material. Decorridos, aproximadamente, 45 dias deste período foram coletadas amostras para determinação da densidade dos solos. As densidades médias encontradas foram 1,30 e 1,50 g cm⁻³, para os solos argiloso e arenoso, respectivamente.

Em cada uma das bombonas foram instalados 6 extratores de cápsula porosa para obtenção da solução do solo, sendo 1 em cada camada de 0,1 m de solo. Os extratores instalados formavam um semicírculo em volta de um tubo de PVC (DE = 56,5 mm, DI = 51 mm e comprimento de 1,0 m) fixado ao solo, no interior de cada bombona, para inserção da sonda Diviner 2000. A instalação foi feita de modo a garantir um bom contato entre o solo e os tubos, causando o mínimo de perturbação no perfil.

As Figuras 1A, 1B, 1C, 1D, 1E e 1F apresentam, em ordem cronológica, as etapas de instalação do experimento, desde a locação e preenchimento das bombonas até a instalação dos extratores de solução e tubo de acesso para sonda Diviner 2000.

Figura 1 - Etapas da instalação do projeto: preenchimento com brita (a) e colocação da manta Bidim (b), instalação do tubo de acesso para a sonda Diviner (c) e bombonas preenchidas com os diferentes tipos de solo (d)

Um sistema de irrigação foi montado sobre as bombonas, para permitir a aplicação de fertilizantes, no solo, via fertirrigação. Os emissores, em cada bombona, foram posicionados entre o tubo de acesso e a bateria de extratores, buscando um umedecimento mais uniforme do solo, minimizando a ocorrência de fluxo preferencial nas paredes dos tubos (extratores e tubo de acesso) ou mesmo da própria bombona (Figuras 2A e 2B).

Figura 2 – Sistema de irrigação, montado sobre as bombonas, para aplicação de fertilizantes (a) e (b)

2.2.3 Calibração da sonda Diviner 2000®

A sonda portátil de monitoramento da umidade do solo, “Diviner 2000®”, consiste de um display coletor de dados (datalogger) acoplado, via cabo, a um sensor que, ao ser inserido em um tubo de acesso instalado no solo, provê automaticamente leituras do conteúdo da água em intervalos regulares de 0,1 m.

Esta metodologia, designada por Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) baseia-se na medida da constante dielétrica ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo) para medir a umidade do solo e, o sinal de frequência obtido é convertido em porcentagem de umidade volumétrica (θ) mediante uma equação de calibração previamente ajustada.

Por padrão, a sonda utiliza a equação, do tipo potencial, sugerida pela fabricante; porém, para maior confiança nos dados de umidade obtidos pela sonda, o sensor foi normalizado e calibrado para as condições locais de solo. A equação armazenada no datalogger permite a inserção das constantes A, B e C, obtidas com a calibração.

Embora a amostragem gravimétrica seja o método padrão para determinação da umidade do solo, tal metodologia foi utilizada apenas para a calibração da sonda de capacitância “Diviner 2000®” (Sentek Pty Ltda, Austrália), por se tratar de um método que apresenta algumas dificuldades, tais como: resposta lenta, penoso e altera a estrutura do solo.

A normalização foi feita colocando-se o sensor, envolvido por um tubo de PVC, com as mesmas características do tubo de acesso, em contato com meios diferentes, ar e água, para que este pudesse reconhecer os diferentes materiais presentes em cada meio. Já a calibração propriamente dita, foi feita por comparação das leituras fornecidas pela sonda com valores determinados pelo método gravimétrico.

O procedimento de obtenção da curva de calibração foi realizado seguindo instruções fornecidas pelo fabricante do equipamento (SENTEK, 2000); ou seja, a cada leitura com o equipamento, foram efetuadas coletas (simultâneas e ao redor do tubo de acesso) de amostras de solo para a determinação da umidade volumétrica (θ) pelo método gravimétrico (Figura 3). A coleta da amostra gravimétrica foi feita por meio do método destrutivo, seguindo a metodologia universal descrita em Oliveira et al, 2003.

Figura 3 - Coleta de amostras de solo para determinação umidade pelo método gravimétrico (a) e (b)

O local utilizado para a calibração foi a própria área experimental, onde também foram conduzidos estudos envolvendo a determinação do conteúdo de água no solo. Os tubos de acesso (PVC com comprimento de 1,0 m, cada) encontravam-se instalados, separados entre si, em solos com diferentes níveis de umidade (solo parcialmente seco e solo úmido), procurando-se determinar uma equação com validade para uma maior amplitude de variação de umidade do solo.

As leituras com a sonda, assim como as amostragens para determinação gravimétrica, foram realizadas em diferentes profundidades no perfil do solo; no

entanto, construiu-se apenas uma curva de calibração para cada solo, uma vez que os solos encontravam-se acomodados em bombonas, formando uma única fase.

A escala de frequência (SF) ou frequência relativa, em cada ponto de observação, foi calculada pela equação definida como (eq. 1):

$$SF = (F_A - F_S) (F_A - F_W)^{-1} \quad (1)$$

em que:

F_A = leitura de frequência no tubo de acesso totalmente suspenso no ar, Hz;

F_S = leitura de frequência no tubo de acesso instalado no solo, Hz; e

F_W = leitura de frequência no tubo de acesso imerso em um balde com água, Hz.

A partir do cálculo de frequência relativa (SF) e de posse dos correspondentes valores de umidade volumétrica (θ), obtidos pelo método gravimétrico, construiu-se um gráfico relacionando-se os pares de valores; sendo que no eixo Y foram plotados os valores de SF e no eixo X os valores de θ .

O sistema Statistical Analysis System - SAS, versão 9.1 para Windows (SAS, 2003), foi utilizado para obtenção da equação de regressão, bem como dos coeficientes A, B e C e das estatísticas de avaliação dos resultados.

2.2.4 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos utilizados neste experimento foram obtidos pelas combinações de 2 solos distintos (solo arenoso e solo argiloso) e 3 vazões de gotejadores (2 L h^{-1} , 4 L h^{-1} e 8 L h^{-1}) para aplicação de solução fertilizante (Uréia e Cloreto de potássio), totalizando 6 tratamentos (solo arenoso + 2 L h^{-1} (T1), solo arenoso + 4 L h^{-1} (T2), solo arenoso + 8 L h^{-1} (T3), solo argiloso + 2 L h^{-1} (T4), solo argiloso + 4 L h^{-1} (T5), solo argiloso + 8 L h^{-1} (T6)), que foram distribuídos em delineamento experimental inteiramente casualizado, com 3 repetições; sendo cada parcela constituída por uma bombona de solo extratificada em 6 profundidades (camadas de 10 cm), o que caracterizou um arranjo misto dos tratamentos em esquema fatorial 2×3 com parcelas subdivididas.

As variáveis de estudo desta pesquisa foram a umidade do solo (θ) e o potencial de hidrogênio (pH), condutividade elétrica (CE), concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) e concentração de potássio ($[\text{K}^+]$) na solução do solo.

A Figura 4 ilustra o croqui do experimento, com a disposição das bombonas de solo na casa de vegetação e distribuição dos tratamentos.

Figura 4 - Disposição das bombonas de solo na casa de vegetação e distribuição dos tratamentos.

2.2.5 Sistema e manejo da fertirrigação

Foi utilizado um sistema de irrigação localizada, gotejamento, para aplicação da solução fertilizante (Uréia e cloreto de potássio), composto por um reservatório de PVC com capacidade para 500 litros e 6 linhas de polietileno de 16 mm de diâmetro nominal (Figura 5). Cada linha, que servia a 3 tratamentos simultaneamente, continha 3 gotejadores compensadores de vazão (tipo botão), os quais foram instalados, observando-se a sua vazão, de forma que suas posições na linha de irrigação respeessem o delineamento adotado para o experimento.

Figura 5 - Reservatório de PVC para prepara da solução fertilizante (a) e sistema de distribuição (b)

Os gotejadores, que forneciam vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹, operavam a uma pressão de 200 kPa, fornecida por uma bomba hidráulica centrífuga, de potência igual a 0,5 cv, instalada no interior da casa de vegetação e acionada por um painel eletrônico (Figura 6).

Figura 6 - Bomba hidráulica centrífuga (a) e painel eletrônico para controle do tempo de irrigação (b)

O sistema de irrigação também contava com um filtro de disco, para reter as impurezas presentes na solução fertilizante, e um manômetro para aferição da pressão no interior da tubulação.

Os fertilizantes utilizados foram uréia (45% N) e cloreto de potássio (62% K₂O) e o volume de água aplicado em cada irrigação, bem como as dosagens dos fertilizantes,

foi pré-definido com base em estudos sobre as necessidades hídrica e nutricional da cultura de lima ácida 'Tahiti', conforme o calendário de fertirrigação descrito em Machado, Prada Neto e Coelho (2004), que estudaram o consumo de soluções fertilizantes em plantas adultas de lima ácida 'Tahiti' sobre limão 'cravo' nas condições de irrigação localizada.

Com o objetivo de acompanhar a variação da umidade e condições químicas do solo (pH, CE, $[\text{NO}_3^-]$ e $[\text{K}^+]$), ao longo de sucessivas aplicações, a demanda de uma planta (em fase fisiologia correspondente ao crescimento – Fase 4) por água e fertilizantes foi dividida em partes iguais, com aplicações de Janeiro a Março de 2009.

Desta forma, após concluídas 8 aplicações (fertirrigações), a quantidade de água aplicada nos tratamentos com maior vazão (T3 e T6) correspondia a, aproximadamente, o consumo diário de uma planta adulta (35 litros) e, a quantidade de fertilizantes fornecida correspondia a metade de sua exigência nutricional para a mesma fase (120,61 g de N e 125,01 g de K_2O).

Em função da vazão dos gotejadores, os demais tratamentos receberam, proporcionalmente, 25% (T1 e T4) e 50% (T2 e T5) das quantidades de água e fertilizantes aplicados nos tratamentos T3 e T6. Apenas a concentração dos fertilizantes na água de irrigação foi igual em todos os tratamentos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Concentração e consumo da solução fertilizante, por tratamento, em cada fertirrigação

Solução fertilizante	Tratamentos					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Volume aplicado (L)	1,100	2,000	4,400	1,100	2,000	4,400
[N] + $[\text{K}_2\text{O}]$ (mg L^{-1})	664,556	664,556	664,556	664,556	664,556	664,556

A condutividade elétrica (CE) da solução fertilizante foi de aproximadamente 1 dS m^{-1} , calculada pela razão entre a concentração da solução e uma constante igual a 640 (RICHARDS, 1954).

No decorrer do experimento, foram aplicadas 12 fertirrigações, com duração de 33 minutos (cada) e intervalo de 4 dias entre aplicações; período este necessário para

aplicação de vácuo nos extratores de cápsula porosa e posterior extração e análise química da solução do solo.

2.2.6 Monitoramento da umidade do solo

Para monitoramento do conteúdo de água no perfil do solo, foram realizadas medições pontuais da umidade do solo, utilizando-se para tal, uma sonda de capacitância, modelo “Diviner 2000”, da Sentek Pty Ltda, Austrália.

A sonda portátil de monitoramento da umidade do solo, “Diviner 2000[®]”, possui uma unidade de leitura e coleta de armazenamento, acoplada por cabo a um sensor que, ao ser inserido em tubos de PVC (tubos de acesso) instalado no solo, provê automaticamente leituras do conteúdo da água, com base na medida da constante dielétrica ou capacitância da matriz do solo (ar, água, solo).

Foi instalado, no centro de cada bombona, um tubo de acesso de PVC com comprimento de 1,0 m cada. A instalação dos tubos e as coletas de dados foram realizadas entre os meses de Janeiro e Março de 2009.

As leituras com a sonda foram realizadas nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, e 60 cm do perfil do solo, no momento da aplicação do vácuo nos extratores de solução; sendo que, nos dias em que houve fertirrigação, foram realizadas leituras em intervalos de 6 minutos para observar a movimentação da água e a existência de possíveis caminhos preferências de fluxo.

2.2.7 Extração da solução do solo

As variáveis necessárias para traçar o perfil de distribuição do fertilizante no solo, foram obtidas por meio da extração e análise periódica da solução do solo, a qual era realizada por meio de extratores de cápsula porosa, a cada fertirrigação aplicada.

Os extratores foram dispostos em semicírculo e instalados a uma distância de aproximadamente 15 centímetros uns dos outros. Suas cápsulas foram localizadas em profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 centímetros.

Passadas 12 horas da aplicação da solução fertilizante, e com o auxílio de uma bomba de vácuo, criou-se uma tensão de aproximadamente 80 kPa na câmara interna

de cada extrator, para que estes passassem a succionar a solução do solo. Neste momento eram realizadas, com a sonda Diviner, leituras de umidade em cada uma das profundidades em que se encontravam suas cápsulas.

Dado o tempo necessário para que atingisse um equilíbrio do solo com a cápsula do extrator de solução (24 horas), realizava-se novas leituras para determinação da umidade, e então era dada continuidade com o processo de recolhimento do conteúdo armazenado nos extratores, utilizando-se pra isso uma seringa hospitalar.

As amostras, devidamente identificadas, foram acondicionadas em tubos de acrílico e armazenados em ambiente refrigerado até o momento das análises.

2.2.8 Análise química da solução do solo

As amostras de solução do solo foram submetidas às análises químicas de laboratório para determinação dos os valores de pH, CE, concentração de nitrato e concentração de potássio.

Para determinação de potássio utilizou-se um Fotômetro de chama e as concentrações de nitrato foram obtidas por meio de um espectrofotômetro ultravioleta UV-1203 (Figura 7) adotando-se uma técnica descrita por Yang et al. (1998), fundamentada no método colorimétrico.

(a)

(b)

Figura 7 - Aparelhos utilizados para análises químicas, fotômetro de chama (a) e Espectrofotômetro de ultravioleta – Colorímetro (b)

O pH e a CE das amostras foram determinadas por um medidor de pH e um condutímetro de mesa (Digimed), respectivamente.

2.2.9 Elaboração dos mapas com os resultados

A partir dos valores umidade do solo, pH, condutividade elétrica, concentrações de nitrato e potássio na solução do solo, obtidos ao longo do experimento, foram elaborados mapas com a distribuição destes no perfil do solo. Para confecção e dos mapas utilizou-se o software Surfer, na sua versão 7.0 para Windows.

Em função do elevado número de dados, os mapas permitem melhor interpretação dos resultados.

2.2.10 Análise estatística dos dados

Para análise estatística dos dados de umidade do solo, potencial de hidrogênio, condutividade elétrica, concentração de nitrato e concentração potássio aplicou-se o procedimento *Mixed Procedure* (PROC MIXED) do sistema computacional Statistical Analysis System (SAS, 2003) por ser um procedimento apropriado para a análise de modelos mistos desbalanceados, pois distingue claramente os efeitos fixos e os aleatórios (LITTELL et al., 1996) das fontes de variação em estudo.

Segundo Perri e lemma (1999), O PROC MIXED ajusta o modelo linear misto com a flexibilidade de modelar não somente as médias dos dados, mas também as suas variâncias e covariâncias. Permite uma especificação geral da matriz de covariâncias dos erros e, também permite que os componentes de variação sejam correlacionados.

Os dados de cada variável foram interpretados, individualmente, a partir das análises de variância, utilizando-se o teste F e respeitando-se o delineamento experimental adotado. Por se tratar, neste experimento, da investigação do comportamento dos compostos da solução fertilizante aplicada no solo, realizou-se a comparação entre as médias, utilizando o teste de Tukey, ao nível de 5 % de probabilidade.

A Tabela 3 apresenta a distribuição dos graus de liberdade para as diferentes fontes de variação, conforme o delineamento experimental empregado no experimento.

Tabela 3 - Distribuição dos graus de liberdade para as diferentes fontes de variação

Fontes de Variação (FV)	Grau de Liberdade (GL)	
	Numerador	Denominador
Solo	1	12
Vazão	2	12
Solo*Vazão	2	12
Profundidade	5	60
Solo*Profundidade	5	60
Vazão*Profundidade	10	60
Solo* Vazão*Profundidade	10	60

2.3 Resultados e Discussão

São apresentados na Tabela 4, os níveis de significância dos principais efeitos e suas interações obtidas a partir da análise de variância dos dados referentes à umidade volumétrica do solo (θ_v), potencial de hidrogênio (pH), Condutividade elétrica (CE) concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) e concentração de potássio ($[\text{K}^+]$) por tratamento. Pôde-se observar que exceto os valores de pH e concentração de potássio, todas as outras variáveis foram afetadas pelas interações solo x vazão, solo x profundidade, vazão x profundidade e pela interação tripla entre os fatores, o que de certa forma auxiliará na discussão dos resultados a serem apresentados.

Tabela 4 - Análise dos efeitos do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a umidade do solo (θ_v), potencial de hidrogênio (pH), condutividade elétrica (CE), concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) e concentração de potássio ($[\text{K}^+]$) na solução do solo¹

Fontes de Variação	θ_v	pH	CE	$[\text{NO}_3^-]$	$[\text{K}^+]$
Solo	***	***	***	***	***
Vazão	***	***	***	***	***
Solo*Vazão	***	***	***	***	ns
Profundidade	***	***	***	***	***
Solo* Profundidade	***	ns	***	***	***
Vazão* Profundidade	***	***	***	***	***
Solo*Vazão* Profundidade	***	***	***	***	ns

¹ *** = significância de 5% e ns = não significativo

2.3.1 Calibração da sonda Diviner 2000

As leituras de frequência relativa nos 18 pontos amostrais utilizados para calibração da sonda, em cada tipo de solo, são apresentadas na Tabela 5, associadas aos respectivos valores de umidade determinados pelo método gravimétrico. Observou-se que não se conseguiu obter valores muito elevados de umidade no solo; porém, a amplitude das leituras foi muito boa, uma vez que foram alcançados níveis de umidade variando de 0,03 a 0,31 cm^3 de água por cm^3 de solo, para o solo de textura argilosa. No solo arenoso a umidade oscilou entre 0,03 e 0,27 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Tabela 5 - Umidade gravimétrica e frequência relativa encontrada para os pontos utilizados na calibração da sonda Diviner 2000

Amostra	Solo arenoso		Solo argiloso	
	θ_v	SF	θ_v	SF
1	0,06	0,524130	0,31	0,848466
2	0,07	0,567295	0,05	0,453124
3	0,04	0,436140	0,12	0,613577
4	0,13	0,654140	0,08	0,501849
5	0,12	0,643406	0,10	0,591023
6	0,15	0,675080	0,19	0,735895
7	0,27	0,812592	0,22	0,749131
8	0,25	0,788217	0,26	0,801230
9	0,25	0,816845	0,17	0,689640
10	0,21	0,755895	0,16	0,683686
11	0,18	0,727851	0,27	0,847002
12	0,12	0,629611	0,03	0,312510
13	0,17	0,724252	0,08	0,532208
14	0,22	0,790156	0,26	0,813503
15	0,27	0,821333	0,04	0,367244
16	0,16	0,686532	0,23	0,777636
17	0,03	0,443619	0,13	0,643951
18	0,03	0,383445	0,30	0,832326

¹ θ_v = umidade gravimétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); SF = frequência relativa.

Embora a calibração da sonda tenha sido realizada em condições de solo confinado em bombonas, os valores de frequência lidos tiveram boa correlação com a umidade determinada pelo método considerado padrão, tanto para o solo arenoso ($R^2 = 0,99,34$) quanto o solo argiloso ($R^2 = 0,9878$).

Os gráficos do ajuste, bem como as equações obtidas são apresentados na Figura 8. Nesta figura pode ser facilmente visualizado que não houve pontos de leituras muito discrepantes no que se refere a curva.

Figura 8 - Curvas de calibração obtidas para o solo arenoso (a) e solo para o solo argiloso (b)

É importante ressaltar que, antes da calibração da sonda, foi feita a normalização do sensor encontrando-se os valores de 164.216 e 121.427 para F_A e F_W , respectivamente. Ao final da calibração obteve-se valores de 0,2299 e 0,3050 para os coeficientes a e b da equação de calibração no solo arenoso e 0,2254 e 0,3954 para esses mesmos coeficientes na equação de calibração no solo argiloso.

A utilização de uma única equação para todas as profundidades, no mesmo solo, deveu-se ao fato de tratar-se de solos que foram obtidos de camadas pouco profundas no campo; além de que foram peneirados e criteriosamente acomodados em bobonas, de forma que constituiu uma única fase.

Diversos Autores (MORGAN et al., 1999; FARES et al., 2004; ANDRADE JUNIOR et al., 2007) encontraram valores de a e b que diferem dos resultados desta pesquisa. Provavelmente, isso se deve ao fato de terem utilizado solos diferentes dos utilizados nesse experimento; ou até mesmo devido a características intrínsecas ao sensor. Sobretudo, qualquer que tenha sido a causa, apenas reforça a necessidade de calibração da sonda para as condições locais, em que se deseja avaliar o conteúdo de água no solo.

2.3.2 Distribuição da água no solo perfil do solo

Pela Tabela 6 podem ser observados os níveis de significância para os efeitos principais e interações das fontes de variação (solo, vazão e profundidade) sobre a distribuição de água no solo. De acordo com a tabela, todas as interações entre os fatores tiveram efeito não significativo ($Pr > 0,05$) sobre a distribuição de água no solo, nas condições deste experimento.

Tabela 6 - Níveis de significância para os efeitos da textura do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a distribuição da água no perfil do solo

Fontes de Variação	Grau de Liberdade (GL)		F	Pr>F
	Numerador	Denominador		
Solo	1	12	36,91	<0,0001
Vazão	2	12	7,50	<0,0077
Solo*Vazão	2	12	0,54	<0,5967
Profundidade	5	60	339,42	<0,0001
Solo* Profundidade	5	60	4,38	<0,0018
Vazão* Profundidade	10	60	1,13	<0,3533
Solo*Vazão* Profundidade	10	60	0,85	<0,5838

Com as leituras realizadas a cada 6 minutos, durante a fertirrigação, foi possível elaborar um mapa de distribuição da água nas diferentes profundidades do perfil do solo, em cada um dos tratamentos (Figura 9). Este mapa permitiu comparar os perfis de umidade obtidos pelos tratamentos. Para melhor visualização, foi plotado no eixo das abscissas as avaliações ou leituras de umidade e no eixo das ordenadas as profundidades.

De acordo com a Figura 9, nos tratamentos que tiveram gotejadores de menores vazões, T1 e T4 (2 L h^{-1}) T2 e T5 (4 L h^{-1}) o volume de solução aplicado não foi suficiente para que as primeiros 20 centímetros do perfil do solo atingisse umidades próximas a $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, nos primeiro minutos de irrigação. Nos tratamentos T1 e T2 este comportamento está melhor evidenciado; o que está relacionado com a textura do solo (solo arenoso em ambos os tratamentos). Pois, nos tratamentos T2 e T5 (solo argiloso) a umidade já superava $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, antes mesmo da segunda leitura de umidade (6 minutos), enquanto que o solo argiloso só atingiu valores próximos a esse após 20 minutos de aplicação.

Um outro aspecto importante que pôde ser observado no mapa correspondente ao tratamento T3 (Figura 9), é a ocorrência de elevados valores de umidade em pontos isolados (profundidades de 20 e 30 cm, entre a quarta e sétima avaliação), com a mesma tendência sendo observada para o tratamento T6. Em se tratando de um solo arenoso no tratamento T3 e considerando que ambos os tratamentos correspondem aqueles com maior taxa de aplicação de água no solo (maior vazão de dos gotejadores), pode-se associar este fato à existência de caminho preferencial de fluxo no solo, alterando a sua condutividade hidráulica de forma a provocar distorções nas leituras da sonda Diviner 2000, utilizada para as leituras de umidade.

Em se confirmada a ocorrência de caminho preferencial de fluxo, a causa da pode está no próprio equipamento utilizado para mensuração da umidade: a sonda. Pois, mesmo atentando a todos os cuidados e recomendações do fabricante, para a instalação dos tubos, este problema poderá acontecer em função da interface entre o solo e o tubo.

Independente da ocorrência de fluxo preferencial, os tratamentos T3 e T6, quando comparados aos demais, promoveram a elevação da umidade em profundidade. Isto demonstra que, nos casos em que se aplicam soluções contendo sais solúveis, estes podem se dissolver e juntamente com a água atingir profundidades elevadas.

Numa comparação entre os tratamentos T1, T2, T4 e T5 nota-se que, mesmo com aplicação de volumes diferentes, o padrão de distribuição da umidade é semelhante.

Figura 9 - Distribuição espacial da água nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009

A Tabela 7 apresenta as médias dos valores de umidade volumétrica no solo. Analisando-se estas médias de umidade, é possível observar um aumento gradativo dos valores de umidade à medida que se avança no perfil do solo em profundidade. Isto acontece independente do solo ou vazão dos gotejadores. O que vem a confirmar resultados apresentados na tabela estatística de análise de variância.

Tabela 7 - Médias dos valores de umidade (θ_v) nos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h⁻¹, de janeiro a março de 2009¹

Solo	Profundidade (cm)	Vazão dos gotejadores (L h ⁻¹)		
		2	4	8
Arenoso	10	05,90 Fa	07,73 Da	09,26 Ea
	20	12,63 Ea	13,60 Da	15,66 Da
	30	16,40 DEa	18,26 Ca	19,23 CDa
	40	17,30 DEa	19,20 BCa	21,33 BCa
	50	18,40 CDa	19,73 BCa	23,23 BCa
	60	20,70 BCa	23,40 ABa	25,53 ABa
Argiloso	10	10,13 Ea	08,70 Da	10,40 Da
	20	17,10 CDa	15,60 Ca	17,10 Ca
	30	20,40 BCa	20,76 BCa	23,66 Ba
	40	21,56 BCa	24,06 ABa	26,06 ABa
	50	24,50 Ba	26,13 Aa	27,10 ABa
	60	27,20 Aa	28,26 Aa	30,36 Aa

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P>0,05).

2.3.3 Distribuição do íon nitrato no perfil do solo

Os níveis de significância para os efeitos principais e interações das fontes de variação (solo, vazão e profundidade) sobre a distribuição do íon nitrato no solo, são apresentados na Tabela 9. De acordo com a tabela, todas as interações entre os fatores tiveram efeito significativo (PR<0,05) sobre a distribuição do íon nitrato no solo, nas condições deste experimento.

Tabela 8 - Níveis de significância para os efeitos da textura do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a distribuição do íon nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) no perfil do solo

Fontes de Variação	Grau de Liberdade (GL)		F	Pr>F
	Numerador	Denominador		
Solo	1	12	192,82	<0,0001
Vazão	2	12	137,01	<0,0001
Solo*Vazão	2	12	29,45	<0,0091
Profundidade	5	60	54,15	<0,0001
Solo* Profundidade	5	60	15,27	<0,0001
Vazão* Profundidade	10	60	17,22	<0,0001
Solo*Vazão* Profundidade	10	60	6,21	<0,0001

Os valores médios da concentração de nitrato foram calculados em cada tratamento e os resultados ficaram entre 237,26 mg L⁻¹ (solo argiloso com aplicação de 2 L h⁻¹) e 923,82 mg L⁻¹ (solo arenoso com aplicação de 8 L h⁻¹). Com os resultados, ficou evidenciado que o solo arenoso apresentou maior predisposição à ocorrência de lixiviação de nitrato, podendo os sistemas de fertirrigação, quando mal manejados neste tipo de solo, apresentarem problemas como perda de fertilizantes aplicados e contaminação de mananciais hídricos.

Quando comparados os valores de concentração de nitrato entre os tipos de solo e em profundidade, no perfil do solo, observou-se que as maiores médias concentraram-se nas camadas superiores para os dois tipos de solo com médias de 901,90 mg L⁻¹, para a profundidade de 10 cm no solo arenoso e 776,17 mg L⁻¹, para a profundidade de 10 cm no solo argiloso.

As diferenças entre as médias nas profundidades não foram muito elevadas para o solo arenoso, como foram para o solo argiloso, reforçando a maior facilidade de deslocamento do nitrato neste tipo de solo. O solo arenoso apresentou sua menor média igual a 569,28 mg L⁻¹ a 60 cm de profundidade, enquanto que o para esta mesma profundidade no solo argiloso, a média foi de 190,72 mg L⁻¹.

Se comparados apenas as taxas de aplicação (vazão dos gotejadores) com a as profundidades, observou-se que as maiores taxas de aplicação apresentaram maior poder de carreamento do nitrato, como já era de se esperar; porém, as maiores médias ficaram concentradas nas três primeiras camadas. Esta tendência também foi observada para as vazões menores, o que significa que a lixiviação de nitrato está diretamente relacionada como a sua taxa de aplicação.

As concentrações do íon nitrato ($[\text{NO}_3^-]$), em mg L^{-1} , observadas nas soluções extraídas do solo pelos extratores de solução, instalados em diferentes profundidades, para cada tratamento denominados de “leituras” (numeradas de 1 a 13), foram plotados pelo programa “Surfer” (versão 7.0 para Windows), de maneira a se observar a sua distribuição no solo (Figura 10).

As concentrações de nitrato encontradas nos tratamentos com solo arenoso foram maiores do que aquelas encontradas para o solo argiloso, uma vez que o nitrato trata-se de um ânion e não ficar retido em solos com predominância de cargas negativas. Para o solo arenoso, o comportamento do íon nitrato foi semelhante em todos os tratamentos ($P > 0,05$), atingindo profundidades elevadas desde a sétima avaliação (Figura 10).

A Tabela 9 refere-se ao efeito da interação tripla entre os fatores, sobre a distribuição de nitrato no perfil do solo. Numa comparação, pelo teste de Tukey a 5%, não houve muita diferença, das concentrações nas camadas, entre os tipos de solo mostrando que a dependência maior movimento do nitrato no solo é da taxa de aplicação mesmo. A textura do solo apenas intensifica ou atenua o efeito da vazão.

As concentrações de nitrato apresentaram variações no solo, de acordo com a vazão dos gotejadores, tipo de solo e profundidade; encontrando-se valores médios pontuais entre 397,9 e 1189,63 mg L^{-1} , em condições de solo arenoso, e entre 137,70 e 1182,03 mg L^{-1} , em condições de solo argiloso (Tabela 9). Os maiores valores foram observados nos tratamentos com maior vazão e nas camadas superiores.

Figura 10 - Distribuição espacial do íon nitrato nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009

Tabela 9 - Médias dos valores de concentração de nitrato ($[\text{NO}_3^-]$) na solução dos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h^{-1} , de janeiro a março de 2009¹

Solo	Profundidade (cm)	Vazão dos gotejadores (L h^{-1})		
		2	4	8
Arenoso	10	938,67 Aa	959,97 Aa	807,07 Aa
	20	692,23 ABa	972,17 Aa	769,83 Aa
	30	486,90 ABb	1045,87 Aa	786,57 Aab
	40	446,53 Bb	664,03 ABab	1159,20 Aa
	50	455,70 Bb	555,30 Ab	1189,63 Aa
	60	397,90 BCb	479,30 Bab	830,63 Aa
Argiloso	10	559,17 ABa	815,47 ABa	953,87 Aa
	20	225,17 Cb	934,10 ABa	1180,53 Aa
	30	150,67 Db	601,67 ABa	1182,03 Aa
	40	161,30 Db	194,03 Cb	962,97 Aa
	50	159,07 Db	139,23 Cb	790,70 Aa
	60	168,17 Da	137,70 Ca	266,30 Ba

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

2.3.4 Distribuição do íon potássio no perfil do solo

Na Tabela 10, são apresentados os níveis de significância para os efeitos principais e interações do solo, da vazão dos gotejadores e profundidade do solo sobre a distribuição do íon potássio no solo. De acordo com a tabela, todos os fatores tiveram efeito significativo sobre a distribuição do íon nitrato no solo, nas condições deste experimento, exceto a interação tipo de solo e vazão dos gotejadores ($\text{Pr}>0,5$) e a interação tripla dos fatores.

Tabela 10 - Níveis de significância para os efeitos da textura do solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a distribuição do íon potássio ($[\text{K}^+]$) no perfil do solo

Fontes de Variação	Grau de Liberdade (GL)		F	Pr>F
	Numerador	Denominador		
Solo	1	12	4,93	<0,0464
Vazão	2	12	27,97	<0,0001
Solo*Vazão	2	12	1,35	<0,2961
Profundidade	5	60	76,55	<0,0001
Solo* Profundidade	5	60	4,76	<0,0010
Vazão* Profundidade	10	60	12,09	<0,0001
Solo*Vazão* Profundidade	10	60	1,73	<0,0954

Os valores médios obtidos para as concentrações de potássio nos dois solos foram superiores nos tratamentos com vazão de 8 L h^{-1} , apresentando média igual a $74,81 \text{ mg L}^{-1}$, para o solo arenoso e $32,41 \text{ mg L}^{-1}$ para o solo argiloso. E, mais uma vez evidenciou-se a influência da taxa de aplicação, também sobre a distribuição do potássio no perfil do solo.

As menores médias foram $13,63 \text{ mg L}^{-1}$, para o solo arenoso com vazão de gotejamento igual a 2 L h^{-1} e $10,61 \text{ mg L}^{-1}$ para o solo argiloso com vazão de gotejamento igual a 2 L h^{-1} .

Em termos de profundidade, pode-se afirmar que a distribuição do potássio seguiu a mesma tendência do nitrato, ficando as maiores médias concentradas nas camadas superficiais ($77,56 \text{ mg L}^{-1}$, para o solo arenoso e $39,26 \text{ mg L}^{-1}$ para o solo argiloso); embora atingindo profundidades bem menores. Este fato está relacionado à predominância de cargas negativas na fração sólida do solo, que implicam na retenção desses íons que ficam adsorvidos.

As menores médias encontradas foram $13,17 \text{ mg L}^{-1}$, para o solo arenoso e $11,33 \text{ mg L}^{-1}$ para o solo argiloso, ambos na camada de 60 cm de profundidade.

Numa comparação entre as diferentes vazões e a profundidade, independente do tipo de solo, foi observado que para a vazão igual a 2 L h^{-1} , praticamente não houve diferença de concentração entre as profundidades. Isto está melhor evidenciado na Figura 11. Neste tratamento, a média na camada superior foi de $20,87 \text{ mg L}^{-1}$; mas as médias nas camadas posteriores permaneceram entre $8,87 \text{ mg L}^{-1}$ e $13,53 \text{ mg L}^{-1}$, sendo que esta última foi observada na camada mais profunda (60 cm), permitindo afirmar que a pequena variação entre as médias não ocorreram em função do tratamento e sim do próprio solo.

As maiores médias foram encontradas nos tratamentos de maior vazão e nas duas primeiras camadas do solo, $95,33$ a 10 cm e $86,33$ a 20 cm . Nos tratamentos com vazão intermediária (4 L h^{-1}) as médias foram $59,02$ e $46,68 \text{ mg L}^{-1}$ nas profundidades de 10 e 20 cm , respectivamente.

As concentrações do íon potássio, em mg L^{-1} , observadas nas soluções extraídas do solo pelos extratores de solução, “leituras” numeradas no gráfico de 1 a 13, foram plotadas na forma gráfica (Figura 11) para melhor visualização dos efeitos do

tratamento. Nesta figura fica fácil observar que as concentrações observadas (mg L^{-1}) não foram muito elevadas, se comparadas com a concentração de aplicada (superior a 300 mg L^{-1}).

Na Figura 11, nota-se que, apenas nos tratamentos com maiores vazões foram extraídas quantidades suficientes para que fossem observadas diferenças entre os solos. Neste caso, no solo arenoso foi observadas as maiores concentrações, reforçando afirmativa anterior.

Também pode ser observado que, mesmo em condições de solo arenoso e com vazão de 8 L h^{-1} (tratamentos T3 e T6), quase que não houve a presença do íon potássio nas primeiras leituras e em todas as profundidades.

Na Tabela 11, estão listados os valores médios calculados para cada tratamento. As médias encontradas para os tratamentos com vazão de 8 L h^{-1} foram consideradas iguais pelo teste de Tukey a um nível de significância de 5%, exceto a média de 12,97, encontrada para o solo argiloso na camada de 60 cm. Este tipo de ocorrência já havia sido evidenciado anteriormente pela ausência de interação tripla, apresentada na análise da variância.

Tabela 11 - Médias dos valores de concentração de potássio ($[\text{K}^+]$) na solução dos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h^{-1} , de janeiro a março de 2009¹

Solo	Profundidade (cm)	Vazão dos gotejadores (L h^{-1})		
		2	4	8
Arenoso	10	24,67 Aa	72,67 Aa	135,33 Aa
	20	12,70 ABa	62,67 Aa	124,67 Aa
	30	09,33 ABb	25,73 Aab	108,67 Aa
	40	08,90 Bb	12,30 ABab	40,67 Aa
	50	08,57 Bb	09,43 Ab	26,20 Aa
	60	17,63 BCa	08,53 Bab	13,33 Ab
Argiloso	10	17,07 ABa	45,37 ABa	55,33 Aa
	20	10,60 Cb	30,70 ABa	48,00 Aa
	30	08,50 Db	21,87 ABa	38,00 Aa
	40	08,83 Db	13,63 Cb	22,00 Aa
	50	09,20 Db	11,87 Cb	18,13 Aa
	60	09,43 Da	11,60 Ca	12,97 Ba

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P > 0,05$).

Figura 11 - Distribuição espacial do íon potássio nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009

As médias para os dois tipos de solo, submetidos a uma mesma vazão, foram praticamente as mesmas nas profundidades equivalentes. Isto significa que não houve influência do tipo de solo no deslocamento do íon potássio, o que também já havia sido identificado anteriormente na análise de variância.

2.3.5 Distribuição do pH no perfil do solo

A Tabela 12 apresenta os níveis de significância para os efeitos principais e interações do solo, da vazão dos gotejadores e profundidade do solo sobre a distribuição do pH no perfil do solo. De acordo com a tabela, exceto a interação tipo de solo x profundidade, todos demais fatores tiveram influência (efeito significativo) sobre a distribuição do pH no perfil do solo, nas condições experimentadas.

Tabela 12 - Níveis de significância para os efeitos de solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre o potencial de hidrogênio na solução do solo

Fontes de Variação	Grau de Liberdade (GL)		F	Pr>F
	Numerador	Denominador		
Solo	1	12	46,21	<0,0001
Vazão	2	12	24,90	<0,0001
Solo*Vazão	2	12	6,94	<0,0099
Profundidade	5	60	48,22	<0,0001
Solo* Profundidade	5	60	1,41	<0,2324
Vazão* Profundidade	10	60	10,95	<0,0001
Solo*Vazão* Profundidade	10	60	11,32	<0,0001

As médias de valores de pH encontradas para os dois tipos de solo foram 5,88 e 6,30 para a os tratamentos com vazão igual a 2 L h^{-1} , 4,69e 6,58 para a vazão de 4 L h^{-1} e, 4,21 e 5,21 para os tratamentos com vazão de 8 L h^{-1} , nos solos arenoso e argiloso, respectivamente.

O solo arenoso apresentou médias menores se comparado ao solo argiloso e todas as vazões de aplicação, sendo que se analisadas a médias as vazões, a vazão de 8 L h^{-1} apresentou maior poder de acidificação do solo; o que já era de se esperar, uma vez que as soluções aplicadas tinham a mesma concentração em todos os tratamentos e o tempo de aplicação foi o mesmo. Consequentemente, os tratamentos

com gotejadores de maior vazão (8 L h^{-1}) aplicaram maior quantidade de fertilizante, implicando no resultado encontrado.

Na associação entre as vazões de aplicação e os valores de pH em profundidade, observou-se que houve uma tendência a acidificação do solo em todas as camadas, para os tratamentos com vazão de 8 L h^{-1} , sendo este efeito intensificado nas três primeiras camadas (10, 20 e 30 cm de profundidade). As médias dos valores de pH neste tratamento oscilaram entre 3,94 (20 cm de profundidade) e 5,51 (60 cm de profundidade). É importante ressaltar que o menor valor de pH foi observado na em profundidade próxima à superfície do solo e, sendo este um valor tão baixo, pode afetar de forma significativa o desenvolvimento da maioria das culturas agrícolas.

Pela Figura 12 observa-se a mesma tendência à acidificação em todos os tratamentos; porém, com menor intensidade nos tratamentos com vazões iguais a 2 e 4 L h^{-1} , aplicados ao solo argiloso (tratamentos T4 e T5). Já no solo arenoso, este efeito ocorreu tanto com a maior vazão (8 L h^{-1}) de aplicação quanto com a vazão intermediária (4 L h^{-1}), sendo que, na vazão intermediária a redução nos valores de pH na camada superficial foi maior (maior acidificação). Isto significa que a mesma vazão (4 L h^{-1}) apresentou efeito diferenciado com o tipo de solo.

As diferenças nas respostas dos solos, com relação à vazão aplicada, deveram-se ao fato de que, em função da textura arenosa do solo, no tratamento T3 a solução aplicada atingiu profundidades maiores do que no tratamento T6 (que tem vazão equivalente); ou seja, a taxa de aplicação de 8 L h^{-1} foi suficiente para promover uma “lavagem” do solo no tratamento T3, não ocorrendo o mesmo em T2, que apresentou valores de pH inferiores se comparados aos valores observados em T6 (Figura 12).

Figura 12 - Distribuição espacial do pH nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009

Analisando-se as médias estatísticas apresentadas pela Tabela 13, pôde-se observar que, a um nível de 5% de significância pelo teste de Tukey, não houve diferenças estatísticas entre as médias dos valores de pH nos tratamentos com vazão de gotejamento igual a 2 L h^{-1} , mesmo na comparação entre os solos. Já nos tratamentos com vazão de 4 L h^{-1} , observa-se uma oscilação dos valores de pH entre 3,88 (solo arenoso, a 20 cm de profundidade) e 6,75 (solo argiloso, a 50 cm). Notou-se que no solo argiloso quase que não houve efeito do tratamento, o que é reforçado pela comparação entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tabela 13 - Médias dos valores de potencial de hidrogênio (pH) nos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h^{-1} , de janeiro a março de 2009¹

Solo	Profundidade (cm)	Vazão dos gotejadores (L h^{-1})		
		2	4	8
Arenoso	10	5,38 Aa	4,08 Ea	4,11 CDEa
	20	6,06 Aa	3,88 Eb	3,81 Eb
	30	6,11 Aa	4,46 DEb	3,86 Eb
	40	5,91 Aa	5,12 CDab	4,12 DEb
	50	5,94 Aa	5,25 BCab	4,50 CDEb
	60	5,89 Aa	5,36 BCa	4,87 BCDA
Argiloso	10	6,10 Aa	6,36 ABCa	3,98 Eb
	20	6,28 Aa	6,44 ABCa	4,06 DEb
	30	6,36 Aa	6,51 ABa	5,20 BCa
	40	6,37 Aa	6,73 Aa	5,90 ABa
	50	6,37 Aa	6,75 Aa	6,00 Aa
	60	5,38 Aa	4,08 Ea	4,11 CDEa

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P>0,05$).

Para a vazão de gotejamento de 8 L h^{-1} , o efeito ocorreu em todas as camadas no solo arenoso e praticamente todas no solo argiloso, a exceção das duas últimas camadas que sofreram redução menor nos valores de pH. No solo argiloso, a camada superficial foi a que apresentou a pior média entre suas camadas (3,98).

2.3.6 Distribuição da CE no perfil do solo

Os níveis de significância para os efeitos principais e interações das fontes de variação (solo, vazão e profundidade) sobre a distribuição da condutividade elétrica no perfil do solo, são apresentados na Tabela 14. De acordo com a tabela, todas as interações entre os fatores tiveram efeito significativo ($Pr < 0,05$) sobre a distribuição do íon nitrato no solo, nas condições deste experimento.

Tabela 14 - Níveis de significância para os efeitos de solo, vazão dos gotejadores, profundidade do solo e suas interações sobre a condutividade elétrica (CE) da solução do solo

Fontes de Variação	Grau de Liberdade (GL)		F	Pr>F
	Numerador	Denominador		
Solo	1	12	102,84	<0,0001
Vazão	2	12	76,92	<0,0001
Solo*Vazão	2	12	6,22	<0,0140
Profundidade	5	60	60,30	<0,0001
Solo* Profundidade	5	60	9,97	<0,0001
Vazão* Profundidade	10	60	12,73	<0,0001
Solo*Vazão* Profundidade	10	60	4,99	<0,0001

Os valores de médias encontrados para condutividade elétrica na solução extraída do solo, foram 1,197 e 0,477 dS m⁻¹, para os tratamentos com vazão igual a 2 L h⁻¹, 1,550 e 1,127 dS m⁻¹, para os tratamentos com vazão de 4 L h⁻¹ e, 1,941 e 1,527 dS m⁻¹, para os solos arenoso e argiloso, respectivamente. Com estes resultados pode-se afirmar que o solo argiloso funcionou como uma espécie de “filtro”, retendo todo ou pelo menos maior parte do fertilizante aplicado, o que implicou em aumento de CE como consequência de todas as vazões de gotejamento aplicadas.

Traçando-se uma comparação entre os solos em profundidade, no perfil do solo, nota-se que para o solo arenoso os valores médios da CE permaneceram todos acima de 1 dS m⁻¹, oscilando entre 1,218 e 1,918 dS m⁻¹. Já para o solo argiloso essas médias oscilaram entre 0,375 e 1,703 dS m⁻¹, concordando com afirmativa anterior de o solo argiloso retém os sais aplicados na fertirrigação. Este comportamento, em situações de campo, em que são aplicadas concentrações de fertilizantes bem superiores às ensaiadas neste experimento, pode resultar na salinização destes solos; implicando na

na necessidade de maior atenção no que se refere ao monitoramento da CE nos sistemas de cultivos fertirrigados instalados sobre este tipo de solo.

Avaliando separadamente o efeito das vazões sobre a CE em diferente profundidade no solo, tem-se que a vazão 2 L h^{-1} não promoveu aumento significativo da CE nas camadas; pois, os maiores valores de médias encontrados foram $1,581 \text{ dS m}^{-1}$ na camada de 10 cm de profundidade e $1,004 \text{ dS m}^{-1}$ na camada de 20 cm. Valores estes próximos aos da solução fertilizante aplicada. As demais camadas permaneceram com valores bem abaixo ($0,500$, em média).

Ainda neste mesmo perfil comparativo, com a vazão de gotejamento igual a 8 L h^{-1} todas as camadas apresentaram valores próximos a $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ e a vazão de 4 L h^{-1} (vazão intermediária) chegou a alcançar valores de média superiores a $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ na camada superficial, decrescendo com a profundidade.

Os maiores valores de condutividade encontrados não superam o limite suportado pelas culturas; mas, se considerado que a condutividade da solução fertilizante aplicada era de aproximadamente $1,0 \text{ dS m}^{-1}$, observa-se que a condutividade da solução do solo chegou ser maior que o dobro da concentração aplica. Se observado esta mesma tendência em condições de campo, em que são aplicadas soluções acima de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$, a condutividade elétrica na solução do solo poderá facilmente atingir valores não suportados pelas culturas, salinizando o solo.

Os resultados obtidos para a condutividade, também foram plotados em gráfico, para melhor visualização e análise (Figura 13). No geral, observou-se que a distribuição da condutividade elétrica teve o mesmo comportamento observado para o íon nitrato e apresentou maiores valores nas camadas superiores, aumentando a concentração com as avaliações, chegando a atingir valores superiores a $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ nas primeiras camadas. No tratamento T4, quase que não houve alteração nos valores da CE, em função da baixa vazão de gotejamento (2 L h^{-1}) e do tipo de solo (solo argiloso).

Figura 13 - Distribuição espacial da CE nos 6 tratamentos, às profundidades de 0,10, 0,20, 0,30, 0,40 0,50 e 0,60 m – Piracicaba, SP, 2009

A Tabela 15 refere-se ao efeito da interação tripla entre os fatores, sobre a distribuição da CE no perfil do solo. Nesta, a diferença do efeito entre os tipos de solo é visível, uma vez que, apresenta valores oscilando entre 0,254 e 0,849 nas camadas equivalentes dos diferentes solos. Fato atípico é a ocorrência de valores de CE superiores nas camadas mais profundas, quando comparadas às camadas adjacentes, observado no solo arenoso submetido à vazão de aplicação igual a 8 L h⁻¹.

A explicação para isso pode estar no fato de os íons, principalmente o nitrato, apresentarem distribuição acompanhando o bulbo formado pelos gotejadores. Isto explicaria também a semelhança entre os gráficos de distribuição de nitrato e os gráfico de condutividade elétrica.

Tabela 15 - Médias dos valores de condutividade elétrica (CE) nos solos de textura arenosa e argilosa, nas profundidades 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm, quando submetidos a 12 aplicações de solução fertilizante (fertirrigação por gotejamento), com vazões de gotejadores de 2, 4 e 8 L h⁻¹, de janeiro a março de 2009¹

Solo	Profundidade (cm)	Vazão dos gotejadores (L h ⁻¹)		
		2	4	8
Arenoso	10	1,925 Aa	2,047 Aa	1,781 ABa
	20	1,647 ABa	1,924 ABa	1,984 Aa
	30	1,017 BCa	1,849 Aa	1,856 ABa
	40	0,938 BCb	1,536 ABa	2,078 Aa
	50	0,883 BCb	1,096 BCb	2,011 Aa
	60	0,872 BCDB	0,849 BCb	1,934 Aa
Argiloso	10	1,237 ABb	2,139 Aa	1,734 ABa
	20	0,460 Cb	2,038 Aa	1,983 Aa
	30	0,284 Ec	1,539 ABab	1,967 Aba
	40	0,311 Db	0,515 Cb	1,728 ABa
	50	0,286 Eb	0,279 Db	1,167 Ba
	60	0,287 Ea	0,254 Da	0,583 Ca

¹ Médias seguidas pela mesma letra, minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey (P>0,05)

3 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- a) As leituras de capacitância apresentaram alta correlação com os valores medidos de umidade volumétrica, tanto do solo arenoso ($R^2=0,99$) quanto o solo argiloso (0,98), em um intervalo de aplicabilidade de 0,03 a 0,27 e de 0,03 a 31 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente;
- b) Mesmo para condições de solo confinado em bombonas, a técnica da reflectometria no domínio da frequência mostrou-se apropriada para obtenção da umidade do solo, devendo-se atentar para o momento de instalação dos tubos de acesso, de maneira a minimizar a formação de caminhos preferenciais de fluxo de água;
- c) A técnica da FDR, por meio da sonda Diviner 2000, apresentou como principais vantagens a rapidez e precisão na obtenção das leituras, porém, para maior confiabilidade nos dados obtidos, deve-se realizar uma calibração para cada local em que se deseja realizar avaliações de umidade do solo por meio do uso da reflectometria no domínio da frequência com a sonda Diviner 2000;
- d) A percolação do nitrato está diretamente relacionada com o tipo de solo e a taxa de aplicação deste nutriente no solo;
- e) O uso da fertirrigação por gotejamento com taxas de aplicação muito elevadas, promove o deslocamento de íons em profundidade, sendo este efeito mais intensificado nos solos de textura arenosa;
- f) Os íons potássio e nitrato no solo argiloso apresentaram maior interação com a fração sólida do solo em relação ao solo arenoso;
- g) O uso de extratores de cápsula porosa mostrou-se apropriado para a extração da solução do solo, apresentando problemas apenas na camada mais superficial por causa da umidade do solo, reduzida na superfície;
- h) Mesmo em um curto intervalo de tempo e com um número reduzido de aplicações (fertirrigações), foi possível visualizar diferenças significativas nos valores de pH e condutividade elétrica na solução do solo.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. J.; SILVA, C. R.; ROSSINI, D. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.4, p.303-307, 2007. DETOMINI, E. R. Técnicas de avaliação de água no solo baseadas no uso de refletômetro no domínio de frequência-FDR. Piracicaba: 2007. 49p. (Relatório Técnico).
- ARAUZO, M.; DÍEZ, J. A.; HERNÁIZ, P. Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. In: , ÁLVAREZ-BENEDÍ, J. ;MARINERO,P. Locval: Editora, 2003. v.7 : Estudios de La Zona No Saturada del Suelo.
- BAR-YOSEF, B. Advances in fertirrigation. **Advances in Agronomy**, New York, v. 65, p. 1-77, 2000.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657 p.
- BOSWELL, F.C.; MEISINGER, J.J.; CASE, N.L. Production, marketing, and use of nitrogen fertilizers. In: ENGELSTAD, O.P. **Fertilizer technology and use**. 3rd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1985. p. 229-292.
- BURT, T.P.; HEATHWAITE, A.L.; TRUDGILL, S.T. **Nitrate process, patterns and management**. Chichester: John Wiley, 1993. cap.15, p.404-408.
- CÂMARA, G.M.S.; GODOY, O.P.; FILHO, J.M.; FONSECA, H. **Produção, pré-processamento e transformação agroindustrial**. Piracicaba. FEALQ, 1982. 83p.
- COELHO, E.F.; MAGALHÃES, A.F.J.; COELHO FILHO, M.A. **Irrigação e fertirrigação em citros**. Cruz das Almas: EMBRAPA, CNPMF, 2004. 16 p. (EMBRAPA, CNPMF, Circular Técnica, 72).
- DÍEZ J.A., CABALLERO R., ROMAN R., TARQUIS A., CARTAGENA M.C. Y VALLEJO A. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. **Journal Environmental Quality** . Madison, v.29, p.1539-1547, 2000.
- DUENHAS, L. H.; VILLAS BÔAS, R. L.; SOUZA, C. M. P.; RAGOZO, C. R. A.; BULL, L. T. Fertirrigação com diferentes doses de NPK e seus efeitos sobre a produção e qualidade de frutos de laranja (*Citrus sinensis* O.) 'Valência'. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.24, no.1, 2002. ISSN 0100-2945.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: EMBRAPA Solos; Embrapa Informática Agropecuária; EMBRAPA Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. 370 p.

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

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: ESAL, FAEPE, 1994. 227 p.

FARES, A.; ALVA, K.A. Estimation of citrus evapotranspiration by soil water mass balance. **Soil Science**, Philadelphia, v.164, n.5, p. 302-310, 1999.

FARES, A.; ALVA, A. K. Soil water components based on capacitance probes in sandy soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.64, p.311-318, 2000.

FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A.I.; PARSONS, L.R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.4, p.1390-1399, 2004.

FARIA, M. A.; SILVA, E. L.; VILELA, L. A. A.; SILVA, A. M. Manejo da irrigação. In: SIMPÓSIO DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: SBEA/DEG-UFLA, 1998. p. 199.

FERNANDES, A.L.T.; SANTINATO, R.; SANTO, J.E.; AMARAL, R. Comportamento vegetativo-produtivo do cafeeiro Catuaí cultivado no oeste baiano sob irrigação por pivô central. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA EM CAFEICULTURA IRRIGADA, 1., 1998, Araguari. Uberlândia: UFU/DEAGO, 1998. p.40-44.

FERREIRA, P.A.; MARTINEZ, M.A. Movimento e modelagem de sais no solo. In: Gheyi, H. R.; Queiroz, J. E.; Medeiros, J. F. de (Ed.). **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. p.171-206.

FOLEGATTI, M.V.; BLANCO, F.F.; SILVA, L.B.D. **Manejo da irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP/LER, 2003. 123 p.

GARDNER, C.M.K.; BELL, J.P.; COOPER, J.D.; DEAN, T.J.; HODNETT, M.G.; GARDNER, N. Soil water content. In: SMITH, R.A.; MULLINGS, C.E. (Ed.) **Soil analysis: Physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. cap.1, p. 1-73.

GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J. **Princípios de fertilidade do solo**. Porto Alegre: Departamento de solos da UFRGS, 1995. 277 p.

GIRONA, J. MATA, M.; FERERES, E.; GOLDHAMER, D.A.; COHEN, M. Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water stress. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.54, p.107-122, 2002.

GUERREIRO, C.; CATRONGA, H.; BOTETA, L.; OLIVEIRA, I. Monitorização da água do solo na cultura da beterraba sacarina (*beta vulgaris*). In: CONGRESSO DE REGA E DRENAGEM, 2005, Beja. **Anais....** Beja, 2005.

HERMANN, P. S. de P. **Construção de equipamento para medida de umidade do solo através da técnica de reflectometria no domínio do tempo**. 1993. Dissertação (Mestrado na área de física) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1993.

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

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

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation desing**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 182 p.

KLUTE, A. **Methods of soil analysis, Part 1 – Physical and Mineralogical Methods**, 2nd ed. Madison, Wisconsin: ASA/SSSA, 1986, (Agronomy Series Number, 9).

LELIS NETO, J.A. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2008.

LITTELL, R.C.; MILLIKEN, G.A.; STROUP, W.W.; WOLFINGER, R.D. **SAS system for mixed models**. Cary: Statistical Analysis System Institute, 1996. 633p.

MACHADO, C.C.; PRADA NETO, I.; COELHO, R.D. Consumo de soluções fertilizantes em lima ácida Tahiti sob irrigação localizada. **Irriga**, Botucatu SP, v.9, n.3, p. 235-247, 2004.

MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. 2. ed. Piracicaba. Instituto Internacional de Pesquisa da Potassa, 1980. 91 p. (Boletim Técnico, 4).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1997. 319 p.

MARSH, A. **Irrigation**. Water Reuther, The Citros Industry. University of California. v.3, p.230-279, 1968.

Medeiros, P.R.F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do pepino enxertado**. 2007. 83 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MEURER, E.J.; BISSANI, C.A.; SELBACH, P. A. Poluentes do solo e do ambiente. In: Meurer, E. J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000, v.1, p.151-168.

MIRANDA, J. H. **Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado** 2001. 95p. Tese (Doutorado na área de irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. 9.

MORGAN, K.T.; PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A.; PITTS, D.J.; OBREZA, T.A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.987-989, 1999.

MUCHOVEJ, R.M.C; RECHCIGL, J.E. Impacts of nitrogen fertilization of pastures and turfgrasses on water quality. In: LAL, R.; STEWART, B.A. (Ed.). **Soil processes and water quality**. Boca Raton. Lewis Publication, 1994. p. 91-135.

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

PADOVESE, P.P. **Movimento e perdas de nitrogênio e potássio num solo com cana-de-açúcar (Saccharum ssp.)**. 1988. 119 p. Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PERRI, S.H.V.; IEMMA, A.F. **Procedimento "MIXED" do SAS® para análise de modelos mistos**. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 959-967, Oct.1999.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill. 1985. 486p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da material e da energia em ecossistemas**. 2 ed., Piracicaba: USP/ESALQ, 1996, 505 p.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. 4 ed. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 2002. 338p.

RICHARDS, L.A. (Ed.) **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160 p. (USDA. Agriculture Handbook, 60).

RHOADES, J.D. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. **Advances in agronomy**, San Diego, v.49, p.201-251, 1994.

ROCHA, G. C.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; CRUZ, A. C. R. Estabilidade temporal da distribuição espacial da armazenagem de água em um solo cultivado com citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.41-50, 2004.

ROLSTON, D. E.; MILLER, R. J.; SCHULBACH. Management principles: fertilization. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. **Trickle irrigation for crop production design operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 317-344.

SAS Institute inc. SAS 9.1 Cary, 2003.

SCALOPPI, E.J.; BRITO, R. A. Qualidade da água e do solo para irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 80-94, 1986.

SENTEK, 2000. **Diviner 2000 Sonda portátil para medição do teor de umidade no solo**. Sentek Pty Ltd; Diviner 2000. www.aquagri.com/pdf/diviner.pdf.

SILVA, E.F.F.; DUARTE, S.N.; COELHO, R.D. Salinização dos solos cultivados sob ambiente protegidos no Estado de São Paulo. In: FOLEGATTI, M.V. (Ed.). **Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 267-277.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. Tese (Doutorado na área de irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. 136 p.

SILVA, C.R.; ANDRADE JÚNIOR, A.S.; MELO, F.B.; SOUSA, A.B.; SOUZA, C.F. Calibration of a capacitance probe in a Paleudult. **Scientia agrícola**. (Piracicaba, Braz.) [online]. 2007, vol.64, n.6, p. 636-640.

SPADOTTO, C.A. Comportamento e destino ambiental de herbicidas. Comitê do meio ambiente, sociedade brasileira da ciência das plantas daninhas. <http://www.cnpma.embrapa.br/herbicidas>. Acesso em: 17 Nov. 2008.

SPARKS, D.L.; HUANG, P.M. Physical chemistry of soil potassium. In: MUNSON, R. **Potassium in agriculture: phosphate potash**. Atlanta: American Society of Agronomy; Phosphate Institute, 1985. p. 201-276.

TÁVORA, J.E.M. de. **Reservas minerais de potássio e suas explorações**. INSTITUTO INTERNACIONAL DA POTASSA. Potássio na agricultura brasileira. Brasília, 1982. p. 37-50.

THORBURN, P. J.; BIGGS, J. S.; WEIER, K. L.; KEATING, B. A. Nitrate in groundwater of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, St. Louis, v.94, n.1, p.49-58, 2003.

VANCLOOSTER, M.; VIAENE, P.; CHRISTIAENS, K. A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Leuven: Katholieke Universiteit, Institute for Land; **Water Management** Leuven, 1994. 154 p.

VAN GENUCHTEN, M. T.; WIERENGA, P. J. **Solute dispersion coefficients and retardation factors**. In: KLUTE, A (Ed.). **Methods of soil analysis** – Part I – Physical and mineralogical methods. 2nd ed. ASA/SSSA, Madison, WI, 1986. Chap 44, p. 1025-1053. (Agronomy Series, 9).

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Roma: FAO, 1980. 184p. (Irrigação e Drenagem, 36).

YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E.; KIM, J.J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, p.1108-1115, 1998.

ZANINI, J.R. Distribuição de água e do íon K^+ no solo, aplicados por fertirrigação em gotejamento. II - Teores de K^+ no bulbo molhado. **ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n. 46, p. 24-38, 1991.

ANEXOS

Anexo A - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a primeira fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	6,92	0,44	204,63	8,13
Arenoso	2	20	6,74	0,42	220,98	8,10
Arenoso	2	30	6,55	0,39	243,42	7,90
Arenoso	2	40	6,47	0,42	252,54	7,23
Arenoso	2	50	6,49	0,42	275,74	7,50
Arenoso	2	60	6,46	0,43	272,32	7,97
Arenoso	4	10	6,58	0,42	208,81	8,37
Arenoso	4	20	6,50	0,41	207,29	8,83
Arenoso	4	30	6,42	0,39	254,44	8,63
Arenoso	4	40	6,39	0,42	277,26	8,63
Arenoso	4	50	6,32	0,42	256,35	8,13
Arenoso	4	60	6,24	0,44	255,96	8,37
Arenoso	8	10	6,74	0,50	142,26	8,37
Arenoso	8	20	6,47	0,44	174,21	7,77
Arenoso	8	30	6,42	0,42	160,52	7,43
Arenoso	8	40	6,42	0,38	222,12	7,03
Arenoso	8	50	6,47	0,35	210,71	6,93
Arenoso	8	60	6,29	0,47	259,39	7,53
Argiloso	2	10	6,71	0,22	95,11	8,87
Argiloso	2	20	6,65	0,20	102,71	10,37
Argiloso	2	30	6,77	0,22	128,57	9,60
Argiloso	2	40	6,91	0,20	122,49	10,63
Argiloso	2	50	7,08	0,21	125,91	10,90
Argiloso	2	60	7,12	0,22	127,43	11,43
Argiloso	4	10	6,88	0,31	152,53	10,77
Argiloso	4	20	6,97	0,22	112,60	10,17
Argiloso	4	30	6,85	0,21	122,11	10,50
Argiloso	4	40	6,98	0,22	112,98	10,13
Argiloso	4	50	7,10	0,21	102,71	9,57
Argiloso	4	60	7,30	0,19	110,70	9,53
Argiloso	8	10	6,65	0,19	133,90	9,80
Argiloso	8	20	6,68	0,22	106,14	11,60
Argiloso	8	30	6,75	0,23	105,38	9,87
Argiloso	8	40	6,94	0,22	117,92	10,53
Argiloso	8	50	6,98	0,21	140,36	10,73
Argiloso	8	60	7,16	0,22	130,09	10,57

Anexo B - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a segunda fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m ⁻¹)	NO_3^- (mg L ⁻¹)	K^+ (mg L ⁻¹)
Arenoso	2	10	6,57	0,52	205,39	10,77
Arenoso	2	20	6,48	0,53	242,27	10,33
Arenoso	2	30	6,37	0,57	273,46	10,53
Arenoso	2	40	6,47	0,58	282,96	10,27
Arenoso	2	50	6,44	0,48	288,67	10,07
Arenoso	2	60	6,37	0,57	289,43	10,37
Arenoso	4	10	6,79	0,62	232,01	11,60
Arenoso	4	20	6,63	0,63	237,33	11,87
Arenoso	4	30	6,43	0,58	265,85	10,57
Arenoso	4	40	6,36	0,59	293,61	10,53
Arenoso	4	50	6,30	0,56	283,73	10,07
Arenoso	4	60	6,08	0,54	289,43	10,17
Arenoso	8	10	6,74	0,56	182,57	11,80
Arenoso	8	20	6,65	0,60	199,68	12,87
Arenoso	8	30	6,45	0,63	191,32	11,63
Arenoso	8	40	6,49	0,56	253,68	10,17
Arenoso	8	50	6,45	0,55	265,09	10,30
Arenoso	8	60	6,13	0,57	259,39	9,07
Argiloso	2	10	6,65	0,23	85,98	11,90
Argiloso	2	20	6,57	0,24	90,54	12,60
Argiloso	2	30	6,83	0,26	103,47	13,03
Argiloso	2	40	6,85	0,27	125,15	13,80
Argiloso	2	50	6,90	0,27	130,85	14,13
Argiloso	2	60	6,99	0,28	124,77	14,30
Argiloso	4	10	6,82	0,29	122,49	12,70
Argiloso	4	20	6,86	0,25	114,88	12,87
Argiloso	4	30	6,65	0,25	105,00	13,17
Argiloso	4	40	6,91	0,26	121,73	13,40
Argiloso	4	50	6,97	0,24	103,85	11,87
Argiloso	4	60	6,96	0,26	114,12	12,30
Argiloso	8	10	6,82	0,30	106,90	12,83
Argiloso	8	20	6,84	0,28	102,33	13,47
Argiloso	8	30	6,85	0,28	111,84	14,23
Argiloso	8	40	6,95	0,29	117,54	14,93
Argiloso	8	50	7,00	0,31	136,94	15,60
Argiloso	8	60	7,00	0,30	138,08	15,87

Anexo C - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a terceira fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	6,69	0,55	179,91	12,83
Arenoso	2	20	6,63	0,60	223,26	10,67
Arenoso	2	30	6,72	0,60	279,92	10,90
Arenoso	2	40	6,71	0,63	290,19	10,57
Arenoso	2	50	6,61	0,62	294,37	10,20
Arenoso	2	60	6,33	0,60	294,75	10,63
Arenoso	4	10	6,86	0,84	289,81	15,43
Arenoso	4	20	6,76	0,76	276,88	13,90
Arenoso	4	30	6,78	0,67	276,12	11,20
Arenoso	4	40	6,59	0,65	295,89	10,80
Arenoso	4	50	6,49	0,63	300,08	10,57
Arenoso	4	60	6,25	0,58	288,29	10,57
Arenoso	8	10	6,61	0,90	279,16	18,23
Arenoso	8	20	6,63	0,86	301,60	17,00
Arenoso	8	30	6,65	0,80	283,73	20,17
Arenoso	8	40	6,34	0,67	267,37	10,80
Arenoso	8	50	6,42	0,66	251,02	13,63
Arenoso	8	60	6,14	0,59	281,06	9,90
Argiloso	2	10	6,68	0,24	152,53	11,53
Argiloso	2	20	6,76	0,25	105,38	12,90
Argiloso	2	30	6,84	0,26	98,53	13,20
Argiloso	2	40	6,95	0,29	112,22	13,90
Argiloso	2	50	6,93	0,28	120,21	14,33
Argiloso	2	60	6,96	0,30	127,43	15,43
Argiloso	4	10	6,94	0,37	112,22	14,53
Argiloso	4	20	6,78	0,29	101,19	13,03
Argiloso	4	30	6,81	0,29	108,04	13,80
Argiloso	4	40	6,86	0,30	116,02	13,17
Argiloso	4	50	6,94	0,27	95,49	12,20
Argiloso	4	60	6,94	0,26	104,61	12,53
Argiloso	8	10	6,88	0,46	194,74	18,17
Argiloso	8	20	6,80	0,48	138,08	19,67
Argiloso	8	30	6,95	0,32	104,23	17,33
Argiloso	8	40	6,98	0,32	109,94	15,23
Argiloso	8	50	7,00	0,31	149,49	15,33
Argiloso	8	60	7,01	0,31	143,02	15,60

Anexo D - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a quarta fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m ⁻¹)	NO_3^- (mg L ⁻¹)	K^+ (mg L ⁻¹)
Arenoso	2	10	6,85	0,55	166,98	13,73
Arenoso	2	20	6,85	0,60	246,84	10,50
Arenoso	2	30	6,78	0,64	282,58	10,47
Arenoso	2	40	6,78	0,65	279,92	10,50
Arenoso	2	50	6,76	0,63	286,77	10,47
Arenoso	2	60	6,74	0,64	281,06	12,77
Arenoso	4	10	6,70	1,07	350,27	16,40
Arenoso	4	20	6,78	0,91	359,02	15,13
Arenoso	4	30	6,87	0,69	304,26	11,47
Arenoso	4	40	6,84	0,69	305,40	10,73
Arenoso	4	50	6,83	0,54	304,64	10,90
Arenoso	4	60	6,80	0,71	282,96	10,67
Arenoso	8	10	6,75	1,30	316,81	22,07
Arenoso	8	20	6,74	1,26	450,67	28,03
Arenoso	8	30	6,82	1,19	416,82	21,10
Arenoso	8	40	6,87	0,76	300,84	12,23
Arenoso	8	50	6,82	0,76	290,95	34,17
Arenoso	8	60	6,84	0,66	296,27	9,97
Argiloso	2	10	6,83	0,26	186,75	11,77
Argiloso	2	20	6,90	0,26	98,91	12,73
Argiloso	2	30	6,87	0,25	90,16	12,13
Argiloso	2	40	6,85	0,28	128,57	13,33
Argiloso	2	50	6,85	0,27	114,88	13,73
Argiloso	2	60	6,84	0,30	120,97	14,33
Argiloso	4	10	6,68	0,47	125,91	14,87
Argiloso	4	20	6,72	0,30	107,28	13,67
Argiloso	4	30	6,72	0,28	100,43	13,27
Argiloso	4	40	6,83	0,29	110,32	12,97
Argiloso	4	50	6,84	0,24	100,05	11,93
Argiloso	4	60	6,89	0,25	112,60	12,07
Argiloso	8	10	6,78	0,76	262,43	27,43
Argiloso	8	20	6,79	0,73	206,15	38,67
Argiloso	8	30	6,92	0,44	136,94	27,23
Argiloso	8	40	6,97	0,29	109,56	15,60
Argiloso	8	50	6,94	0,31	116,78	15,20
Argiloso	8	60	6,90	0,30	125,15	14,97

Anexo E - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a quinta fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	6,55	0,70	231,63	13,53
Arenoso	2	20	6,60	0,69	286,01	10,33
Arenoso	2	30	6,53	0,73	322,13	10,33
Arenoso	2	40	6,41	0,73	336,20	10,00
Arenoso	2	50	6,39	0,72	325,56	9,90
Arenoso	2	60	6,34	0,74	325,94	9,97
Arenoso	4	10	6,45	1,25	675,79	21,40
Arenoso	4	20	6,29	1,13	563,99	17,60
Arenoso	4	30	6,36	0,82	380,70	11,83
Arenoso	4	40	6,24	0,81	345,33	10,60
Arenoso	4	50	6,30	0,76	359,78	10,37
Arenoso	4	60	6,32	0,74	323,27	9,93
Arenoso	8	10	6,30	1,56	597,07	39,83
Arenoso	8	20	5,75	1,69	715,72	34,00
Arenoso	8	30	6,01	1,58	642,33	44,17
Arenoso	8	40	6,00	1,02	417,20	13,87
Arenoso	8	50	6,07	0,90	368,91	14,20
Arenoso	8	60	6,14	0,82	347,61	9,57
Argiloso	2	10	6,36	0,36	198,54	12,10
Argiloso	2	20	6,39	0,34	127,05	12,10
Argiloso	2	30	6,58	0,33	111,84	12,20
Argiloso	2	40	6,61	0,35	130,85	12,67
Argiloso	2	50	6,69	0,35	133,52	12,97
Argiloso	2	60	6,73	0,36	147,59	13,43
Argiloso	4	10	6,69	0,53	155,57	14,80
Argiloso	4	20	6,74	0,35	152,91	14,80
Argiloso	4	30	6,75	0,33	120,97	13,10
Argiloso	4	40	6,76	0,29	130,47	12,40
Argiloso	4	50	6,77	0,30	120,21	11,43
Argiloso	4	60	6,79	0,31	119,83	11,60
Argiloso	8	10	6,77	1,09	385,26	24,10
Argiloso	8	20	6,72	1,03	379,55	32,33
Argiloso	8	30	6,85	0,74	242,66	22,40
Argiloso	8	40	6,88	0,44	146,83	16,07
Argiloso	8	50	6,91	0,41	150,63	14,60
Argiloso	8	60	6,91	0,37	149,87	13,98

Anexo F - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a sexta fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	6,51	0,88	306,54	15,70
Arenoso	2	20	6,51	0,71	257,49	12,43
Arenoso	2	30	6,53	0,75	265,09	11,50
Arenoso	2	40	6,46	0,72	288,67	11,57
Arenoso	2	50	6,49	0,75	333,92	11,47
Arenoso	2	60	6,47	0,70	317,95	11,50
Arenoso	4	10	5,54	1,84	846,91	33,67
Arenoso	4	20	5,28	1,89	733,97	24,67
Arenoso	4	30	6,07	1,21	433,55	14,17
Arenoso	4	40	6,18	0,81	350,65	12,13
Arenoso	4	50	6,22	0,81	354,46	11,93
Arenoso	4	60	6,29	0,68	326,32	10,87
Arenoso	8	10	6,63	1,64	656,40	72,00
Arenoso	8	20	5,93	1,71	794,82	65,00
Arenoso	8	30	5,51	1,61	808,89	60,33
Arenoso	8	40	5,75	1,58	557,90	19,27
Arenoso	8	50	5,83	1,21	403,13	16,47
Arenoso	8	60	6,08	0,86	351,41	11,17
Argiloso	2	10	6,33	0,40	215,28	12,33
Argiloso	2	20	6,55	0,32	128,95	13,60
Argiloso	2	30	6,54	0,25	100,81	13,60
Argiloso	2	40	6,58	0,26	116,40	14,13
Argiloso	2	50	6,57	0,25	110,32	14,33
Argiloso	2	60	6,57	0,26	135,42	15,00
Argiloso	4	10	6,50	0,74	185,23	17,37
Argiloso	4	20	6,59	0,64	166,22	18,43
Argiloso	4	30	6,69	0,33	130,09	14,83
Argiloso	4	40	6,64	0,28	104,23	13,70
Argiloso	4	50	6,62	0,23	102,33	12,90
Argiloso	4	60	6,64	0,24	109,94	13,13
Argiloso	8	10	6,62	1,91	533,19	40,33
Argiloso	8	20	6,58	2,00	575,40	46,33
Argiloso	8	30	6,74	1,42	378,79	32,00
Argiloso	8	40	6,77	0,66	178,77	21,30
Argiloso	8	50	6,72	0,40	197,02	15,77
Argiloso	8	60	6,75	0,28	137,70	15,43

Anexo G - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a sétima fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m ⁻¹)	NO_3^- (mg L ⁻¹)	K^+ (mg L ⁻¹)
Arenoso	2	10	6,17	1,28	412,65	16,53
Arenoso	2	20	6,27	0,94	380,32	12,47
Arenoso	2	30	6,52	0,90	362,06	12,03
Arenoso	2	40	6,43	0,90	257,87	11,80
Arenoso	2	50	6,35	0,90	298,95	11,50
Arenoso	2	60	6,31	0,82	359,03	11,63
Arenoso	4	10	5,21	2,21	1009,33	43,50
Arenoso	4	20	5,02	2,19	832,88	28,83
Arenoso	4	30	5,85	1,51	489,87	15,13
Arenoso	4	40	5,89	0,97	391,37	12,37
Arenoso	4	50	6,00	0,93	411,90	11,97
Arenoso	4	60	6,03	0,87	373,09	11,80
Arenoso	8	10	6,29	2,12	610,41	84,83
Arenoso	8	20	6,08	2,28	950,01	78,20
Arenoso	8	30	6,19	2,28	1064,09	61,17
Arenoso	8	40	6,19	1,95	751,50	22,47
Arenoso	8	50	6,08	1,64	548,79	16,40
Arenoso	8	60	6,27	1,06	276,13	12,27
Argiloso	2	10	6,12	0,52	233,15	14,40
Argiloso	2	20	6,20	0,34	144,54	13,87
Argiloso	2	30	6,35	0,30	90,16	13,70
Argiloso	2	40	6,24	0,33	132,76	14,23
Argiloso	2	50	6,28	0,31	130,47	14,53
Argiloso	2	60	6,18	0,31	136,94	15,23
Argiloso	4	10	6,53	1,09	332,78	24,20
Argiloso	4	20	6,41	1,04	307,68	22,83
Argiloso	4	30	6,43	0,42	127,81	15,60
Argiloso	4	40	6,58	0,35	136,94	13,97
Argiloso	4	50	6,36	0,29	125,15	12,77
Argiloso	4	60	6,48	0,27	128,57	12,93
Argiloso	8	10	6,18	2,04	782,69	49,33
Argiloso	8	20	6,11	2,17	797,14	50,17
Argiloso	8	30	6,38	1,58	570,86	34,17
Argiloso	8	40	6,36	0,92	258,25	22,00
Argiloso	8	50	6,35	0,46	158,23	18,13
Argiloso	8	60	6,50	0,31	168,12	16,63

Anexo H - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a oitava fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m ⁻¹)	NO_3^- (mg L ⁻¹)	K^+ (mg L ⁻¹)
Arenoso	2	10	5,94	1,38	647,36	18,47
Arenoso	2	20	6,08	0,96	421,50	12,83
Arenoso	2	30	6,12	0,86	415,42	12,00
Arenoso	2	40	6,12	0,87	530,21	11,43
Arenoso	2	50	6,12	0,83	474,69	11,27
Arenoso	2	60	6,17	0,78	359,87	11,17
Arenoso	4	10	5,31	2,12	1185,10	56,67
Arenoso	4	20	4,83	1,78	1002,56	34,00
Arenoso	4	30	5,65	1,60	666,35	16,13
Arenoso	4	40	5,74	0,94	443,51	12,33
Arenoso	4	50	5,79	0,89	419,17	11,80
Arenoso	4	60	5,83	0,78	380,43	11,53
Arenoso	8	10	6,00	2,15	1015,47	105,33
Arenoso	8	20	4,98	2,23	1116,65	127,33
Arenoso	8	30	5,29	2,21	1081,66	78,00
Arenoso	8	40	5,49	1,44	937,13	29,43
Arenoso	8	50	5,92	1,65	701,39	36,90
Arenoso	8	60	6,05	1,04	451,11	12,20
Argiloso	2	10	6,05	0,61	259,48	13,67
Argiloso	2	20	6,12	0,33	143,82	13,60
Argiloso	2	30	6,21	0,28	120,25	13,23
Argiloso	2	40	6,26	0,29	136,22	13,73
Argiloso	2	50	6,25	0,29	137,74	14,00
Argiloso	2	60	6,23	0,29	152,19	14,67
Argiloso	4	10	6,53	1,51	505,16	30,30
Argiloso	4	20	6,53	1,25	454,97	26,67
Argiloso	4	30	6,71	0,48	163,60	16,50
Argiloso	4	40	6,75	0,34	132,41	13,60
Argiloso	4	50	6,77	0,28	117,96	12,13
Argiloso	4	60	6,73	0,27	124,81	12,23
Argiloso	8	10	6,25	1,85	897,61	51,33
Argiloso	8	20	5,93	2,02	1078,62	58,67
Argiloso	8	30	6,31	1,81	915,07	42,00
Argiloso	8	40	6,44	1,23	403,20	26,83
Argiloso	8	50	6,52	0,56	203,15	18,43
Argiloso	8	60	6,53	0,30	140,05	15,30

Anexo I - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a nona fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	6,04	1,58	687,67	21,33
Arenoso	2	20	6,12	1,10	450,40	12,93
Arenoso	2	30	6,19	0,90	404,77	11,77
Arenoso	2	40	6,18	0,88	409,28	11,50
Arenoso	2	50	6,18	0,86	405,48	11,47
Arenoso	2	60	6,17	0,83	334,77	11,57
Arenoso	4	10	4,78	2,28	1183,58	74,67
Arenoso	4	20	4,59	2,03	1087,75	50,67
Arenoso	4	30	5,41	1,81	816,94	19,10
Arenoso	4	40	5,58	1,06	462,52	12,57
Arenoso	4	50	5,66	0,96	464,80	11,73
Arenoso	4	60	5,73	0,82	401,73	11,53
Arenoso	8	10	5,67	2,05	960,71	144,67
Arenoso	8	20	4,98	2,16	1131,86	158,00
Arenoso	8	30	4,99	2,11	1010,17	106,67
Arenoso	8	40	5,05	2,06	1154,67	47,33
Arenoso	8	50	5,17	1,95	966,06	35,00
Arenoso	8	60	5,49	1,27	528,69	13,03
Argiloso	2	10	6,03	0,74	267,08	15,70
Argiloso	2	20	6,11	0,37	113,40	13,67
Argiloso	2	30	6,17	0,29	84,50	13,20
Argiloso	2	40	6,21	0,30	98,95	13,47
Argiloso	2	50	6,22	0,29	124,05	13,90
Argiloso	2	60	6,21	0,30	109,60	14,37
Argiloso	4	10	6,50	1,70	591,87	40,87
Argiloso	4	20	6,44	1,59	587,30	30,67
Argiloso	4	30	6,60	0,67	194,02	19,93
Argiloso	4	40	6,71	0,37	109,60	13,57
Argiloso	4	50	6,72	0,28	85,26	11,93
Argiloso	4	60	6,69	0,27	129,37	12,17
Argiloso	8	10	5,21	1,99	926,51	64,67
Argiloso	8	20	4,91	2,04	1066,45	66,00
Argiloso	8	30	5,86	1,97	952,37	51,33
Argiloso	8	40	6,09	1,52	658,74	34,00
Argiloso	8	50	6,24	0,77	262,47	22,83
Argiloso	8	60	6,32	0,35	108,86	15,60

Anexo J - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a décima fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	6,06	1,97	705,16	20,67
Arenoso	2	20	6,27	1,37	424,54	13,20
Arenoso	2	30	6,31	0,99	302,86	11,57
Arenoso	2	40	6,21	0,95	340,07	11,10
Arenoso	2	50	6,26	0,91	339,31	11,10
Arenoso	2	60	6,15	0,84	299,79	10,90
Arenoso	4	10	4,84	2,41	897,61	68,00
Arenoso	4	20	4,50	2,32	813,95	56,00
Arenoso	4	30	5,30	2,19	756,85	21,83
Arenoso	4	40	5,59	1,33	435,14	13,87
Arenoso	4	50	5,66	1,07	378,86	12,10
Arenoso	4	60	5,89	0,87	389,56	11,43
Arenoso	8	10	4,79	1,95	744,71	127,33
Arenoso	8	20	4,44	2,13	737,89	136,67
Arenoso	8	30	4,55	2,08	748,54	104,00
Arenoso	8	40	4,76	2,43	991,92	42,00
Arenoso	8	50	5,09	2,33	897,61	34,70
Arenoso	8	60	5,39	1,54	489,90	14,53
Argiloso	2	10	6,03	1,02	339,34	17,00
Argiloso	2	20	6,36	0,42	111,88	13,80
Argiloso	2	30	6,42	0,30	80,70	12,70
Argiloso	2	40	6,47	0,32	86,78	13,20
Argiloso	2	50	6,44	0,32	88,30	13,67
Argiloso	2	60	6,43	0,32	103,51	14,27
Argiloso	4	10	6,16	1,91	590,34	31,80
Argiloso	4	20	6,19	1,99	611,64	24,67
Argiloso	4	30	6,33	1,04	261,71	18,37
Argiloso	4	40	6,50	0,47	131,65	13,93
Argiloso	4	50	6,55	0,29	70,81	12,03
Argiloso	4	60	6,51	0,29	79,18	12,10
Argiloso	8	10	4,80	1,94	737,89	46,67
Argiloso	8	20	5,13	1,90	867,19	52,00
Argiloso	8	30	5,22	1,92	1004,09	42,67
Argiloso	8	40	5,84	1,62	670,15	28,00
Argiloso	8	50	6,03	1,03	308,86	21,63
Argiloso	8	60	6,14	0,43	124,83	16,40

Anexo K - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a décima primeira fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	5,56	1,81	907,47	26,07
Arenoso	2	20	5,88	1,29	597,95	13,60
Arenoso	2	30	5,94	0,93	534,06	11,97
Arenoso	2	40	5,87	0,91	521,11	11,50
Arenoso	2	50	5,90	0,83	504,35	11,37
Arenoso	2	60	5,90	0,78	473,95	11,20
Arenoso	4	10	4,46	2,00	1191,18	108,67
Arenoso	4	20	4,24	1,99	1150,11	87,33
Arenoso	4	30	4,89	2,07	1078,57	30,50
Arenoso	4	40	5,28	1,28	619,19	13,97
Arenoso	4	50	5,38	1,00	525,65	12,33
Arenoso	4	60	5,51	0,91	462,57	11,63
Arenoso	8	10	5,12	1,46	788,06	167,33
Arenoso	8	20	4,40	1,91	905,21	186,67
Arenoso	8	30	4,48	1,78	835,24	154,00
Arenoso	8	40	4,59	2,06	1294,62	62,67
Arenoso	8	50	4,75	2,11	1299,18	41,70
Arenoso	8	60	5,07	1,65	763,72	15,80
Argiloso	2	10	5,91	1,01	540,12	20,90
Argiloso	2	20	6,02	0,39	243,45	15,40
Argiloso	2	30	6,11	0,30	152,97	13,37
Argiloso	2	40	6,16	0,27	160,58	13,43
Argiloso	2	50	6,14	0,27	156,78	14,10
Argiloso	2	60	6,11	0,27	165,90	14,43
Argiloso	4	10	6,36	1,82	856,54	46,73
Argiloso	4	20	6,35	1,98	912,82	34,67
Argiloso	4	30	6,44	1,17	512,69	25,33
Argiloso	4	40	6,59	0,49	200,86	14,63
Argiloso	4	50	6,55	0,26	144,58	12,30
Argiloso	4	60	6,53	0,23	149,91	12,07
Argiloso	8	10	4,34	2,11	1182,05	77,67
Argiloso	8	20	4,70	2,15	1250,50	78,00
Argiloso	8	30	5,40	1,89	1258,11	62,00
Argiloso	8	40	5,88	1,49	966,79	37,33
Argiloso	8	50	6,07	1,04	441,57	27,07
Argiloso	8	60	6,19	0,41	224,47	17,10

Anexo L - Valores médios de pH, condutividade elétrica (CE), e concentrações dos íons nitrato (NO_3^-) e potássio (K^+) na solução do solo, obtidos após a décima segunda fertirrigação.

Solo (textura)	Vazão (L h^{-1})	Profundidade (cm)	pH	CE (dS m^{-1})	NO_3^- (mg L^{-1})	K^+ (mg L^{-1})
Arenoso	2	10	5,38	1,93	938,68	24,67
Arenoso	2	20	6,06	1,55	692,26	12,70
Arenoso	2	30	6,11	1,02	486,91	9,33
Arenoso	2	40	5,91	0,94	446,55	8,90
Arenoso	2	50	5,94	0,88	455,67	8,57
Arenoso	2	60	5,89	0,87	397,90	17,63
Arenoso	4	10	4,08	2,05	959,97	72,67
Arenoso	4	20	3,88	1,92	972,14	62,67
Arenoso	4	30	4,46	1,85	1045,86	25,73
Arenoso	4	40	5,12	1,54	664,07	12,30
Arenoso	4	50	5,25	1,10	555,31	9,43
Arenoso	4	60	5,36	0,85	479,30	8,53
Arenoso	8	10	4,11	1,78	807,08	135,33
Arenoso	8	20	3,81	1,98	769,83	124,67
Arenoso	8	30	3,86	1,86	786,57	108,67
Arenoso	8	40	4,12	2,08	1159,24	40,67
Arenoso	8	50	4,50	2,01	1189,66	26,20
Arenoso	8	60	4,87	1,93	830,65	13,33
Argiloso	2	10	6,10	1,24	559,14	17,07
Argiloso	2	20	6,28	0,46	225,20	10,60
Argiloso	2	30	6,36	0,28	150,67	8,50
Argiloso	2	40	6,37	0,31	161,31	8,83
Argiloso	2	50	6,37	0,29	159,03	9,20
Argiloso	2	60	6,32	0,29	168,16	9,43
Argiloso	4	10	6,36	2,14	815,47	45,37
Argiloso	4	20	6,44	2,04	934,11	30,70
Argiloso	4	30	6,51	1,54	601,67	21,87
Argiloso	4	40	6,73	0,51	194,02	13,63
Argiloso	4	50	6,75	0,28	139,26	11,87
Argiloso	4	60	6,72	0,25	137,74	11,60
Argiloso	8	10	3,98	1,73	953,89	55,33
Argiloso	8	20	4,06	1,98	1180,53	48,00
Argiloso	8	30	5,20	1,97	1182,05	38,00
Argiloso	8	40	5,90	1,73	962,99	22,00
Argiloso	8	50	6,00	1,17	600,91	18,13
Argiloso	8	60	6,14	0,58	266,30	12,97

Anexo M - Valores médios de umidade (θ_v), determinados em intervalos de seis minutos, desde o início de uma fertirrigação até o momento da extração da solução pelos extratores de cápsula porosa, nos tratamentos com solo arenoso.

Solo (textura)	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade (cm)	Umidade volumétrica (θ_v)								
			θ_v Ant	θ_v 6	θ_v 12	θ_v 18	θ_v 24	θ_v 30	θ_v 36	θ_v Vac	θ_v Ext
Arenoso	2	10	4,10	5,23	6,75	8,57	9,33	10,15	9,71	5,90	4,88
Arenoso	2	20	11,68	11,74	11,81	12,11	12,33	12,82	13,31	12,61	12,03
Arenoso	2	30	16,01	16,10	16,12	16,22	16,18	16,18	16,18	16,39	16,14
Arenoso	2	40	17,11	17,27	17,27	17,37	17,30	17,29	17,26	17,30	17,12
Arenoso	2	50	18,25	18,40	18,44	18,56	18,46	18,41	18,37	18,40	18,21
Arenoso	2	60	20,60	20,76	20,73	21,05	20,76	20,71	20,64	20,68	20,46
Arenoso	4	10	4,48	8,49	11,25	13,17	13,95	14,53	13,41	7,71	5,79
Arenoso	4	20	12,22	12,28	12,61	13,91	14,61	15,73	16,31	13,59	12,70
Arenoso	4	30	16,75	16,79	16,84	17,23	16,97	17,20	17,87	18,28	17,28
Arenoso	4	40	18,19	18,26	18,35	18,69	18,39	18,36	18,34	19,21	18,69
Arenoso	4	50	19,20	19,26	19,35	19,69	19,38	19,32	19,34	19,74	19,46
Arenoso	4	60	23,13	23,26	23,31	23,61	23,25	23,16	23,22	23,38	23,30
Arenoso	8	10	5,72	14,65	18,35	20,11	20,87	21,22	18,67	9,29	7,05
Arenoso	8	20	13,86	14,40	17,21	20,26	22,06	23,12	22,34	15,63	14,55
Arenoso	8	30	17,42	17,47	17,50	17,99	19,47	21,79	23,85	19,25	18,00
Arenoso	8	40	19,56	19,58	19,62	19,72	19,71	19,75	21,00	21,32	20,02
Arenoso	8	50	21,84	21,85	21,86	21,95	21,92	21,86	21,89	23,25	22,18
Arenoso	8	60	24,65	24,55	24,55	24,63	24,54	24,50	24,56	25,54	25,00

¹ θ_v Ant = umidade antes do início da fertirrigação; θ_v 6 = umidade seis minutos após início da fertirrigação; θ_v 12 = umidade doze minutos após início da fertirrigação; θ_v 18 = umidade dezoito minutos após início da fertirrigação; θ_v 24 = umidade vinte e quatro minutos após início da fertirrigação; θ_v 30 = umidade trinta minutos após início da fertirrigação; θ_v 36 = umidade trinta e seis minutos após início da fertirrigação; θ_v Vac = umidade no momento da aplicação da tensão nos extratores; e θ_v Ext = umidade no momento da retirada da solução dos extratores.

Anexo N - Valores médios de umidade (θ_v), determinados em intervalos de seis minutos, desde o início de uma fertirrigação até o momento da extração da solução pelos extratores de cápsula porosa, nos tratamentos com solo argiloso.

Solo (textura)	Vazão (L h ⁻¹)	Profundidade (cm)	Umidade volumétrica (θ_v)								
			θ_v Ant	θ_v 6	θ_v 12	θ_v 18	θ_v 24	θ_v 30	θ_v 36	θ_v Vac	θ_v Ext
Argiloso	2	10	7,32	8,88	10,42	11,90	12,73	13,46	13,33	10,14	8,45
Argiloso	2	20	16,03	16,11	16,14	16,41	16,44	16,82	17,49	17,09	16,53
Argiloso	2	30	19,84	19,92	19,96	20,00	20,03	20,02	20,07	20,40	20,10
Argiloso	2	40	21,36	21,48	21,51	21,56	21,56	21,55	21,54	21,57	21,46
Argiloso	2	50	24,42	24,58	24,55	24,63	24,60	24,58	24,60	24,48	24,41
Argiloso	2	60	27,24	27,41	27,35	27,48	27,37	27,33	27,33	27,22	27,19
Argiloso	4	10	5,58	8,38	10,68	11,82	12,86	13,50	13,14	8,69	6,59
Argiloso	4	20	14,61	14,74	15,55	16,83	17,93	18,73	19,00	15,62	14,96
Argiloso	4	30	19,52	19,54	19,66	19,73	20,09	20,95	22,26	20,74	19,92
Argiloso	4	40	22,82	22,87	22,94	22,99	23,03	22,99	23,10	24,05	23,30
Argiloso	4	50	25,37	25,40	25,44	25,53	25,51	25,41	25,53	26,13	25,61
Argiloso	4	60	27,87	27,89	27,92	27,92	27,95	27,86	27,92	28,25	27,99
Argiloso	8	10	6,83	11,56	14,09	15,35	16,46	17,00	15,02	10,42	7,54
Argiloso	8	20	15,48	16,07	18,70	20,83	22,04	22,62	21,83	17,10	15,75
Argiloso	8	30	21,55	21,66	21,81	22,91	25,31	27,36	28,25	23,64	21,96
Argiloso	8	40	24,16	24,20	24,27	24,29	24,47	25,14	26,97	26,09	24,68
Argiloso	8	50	25,77	25,85	25,92	25,97	25,98	25,92	25,98	27,09	26,24
Argiloso	8	60	29,66	29,69	29,70	29,69	29,73	29,65	29,65	30,38	29,92

¹ θ_v Ant = umidade antes do início da fertirrigação; θ_v 6 = umidade seis minutos após início da fertirrigação; θ_v 12 = umidade doze minutos após início da fertirrigação; θ_v 18 = umidade dezoito minutos após início da fertirrigação; θ_v 24 = umidade vinte e quatro minutos após início da fertirrigação; θ_v 30 = umidade trinta minutos após início da fertirrigação; θ_v 36 = umidade trinta e seis minutos após início da fertirrigação; θ_v Vac = umidade no momento da aplicação da tensão nos extratores; e θ_v Ext = umidade no momento da retirada da solução dos extratores.