

MARCELO ROCHA DOS SANTOS

**USO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA AVALIAR A
DISTRIBUIÇÃO DE NITRATO E FÓSFORO EM COLUNAS DE SOLOS
FERTIRRIGADOS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S237u
2008

Santos, Marcelo Rocha dos, 1979-

 Uso da reflectometria no domínio do tempo para
 avaliar a distribuição de nitrato e fósforo em colunas
 de solos fertirrigados / Marcelo Rocha dos Santos.
 – Viçosa, MG, 2008.

 xii, 59f.: il. (algumas col.) ; 29cm.

 Inclui apêndice.

 Orientador: Mauro Aparecido Martinez.

 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
 Viçosa.

 Referências bibliográficas: f. 48-53.

 1. Condutividade elétrica do solo. 2.
 Reflectometria no domínio do tempo. 3. Solos -
 Química do solo. 4. Solos - Fertirrigação. 5. TDR. 6.
 Teor de água no solo.

 I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

MARCELO ROCHA DOS SANTOS

**USO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO PARA AVALIAR A
DISTRIBUIÇÃO DE NITRATO E FÓSFORO EM COLUNAS DE SOLOS
FERTIRRIGADOS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de Julho de 2008



Prof. Antônio Teixeira de Matos
(Co-Orientador)



Prof. Alisson Carraro Borges



Prof. Hugo Alberto Ruiz



Prof. Paulo Afonso Ferreira



Prof. Mauro Aparecido Martinez
(Orientador)

A Deus,

AGRADEÇO

Aos meus pais,
aos meus irmãos,
à minha afilhada,
aos meus amigos,

DEDICO

À comunidade Técnico-Científica.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à natureza, pela nossa existência.

Também agradeço aos meus pais Manoel e Cleuza, por sempre estarem presentes nas contribuições que foram cruciais para a realização desse trabalho.

Aos meus irmãos Cleides, Lucilene, Roseneide, Noeli, Daniel e Inaiá, pela amizade, incentivo e respeito.

À minha afilhada Victoria, pela alegria proporcionada.

Ao Professor Mauro Aparecido Martinez, pela sincera orientação e amizade.

Aos meus co-orientadores Antônio Teixeira de Matos e Rubens Alves de oliveira, pela orientação e colaboração na melhoria do trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) pela oportunidade concedida para a realização do curso.

Aos professores do DEA e outros departamentos, pelo valioso conhecimento transmitido.

Aos funcionários do DEA: Chicão, Eduardo e Simão, pelo apoio.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas João Henrique Zonta, Débora e Flavia, pela contribuição na execução dos trabalhos laboratoriais e pelos incentivos.

Aos professores Alisson Carraro, Hugo Ruiz e Paulo Afonso por fazerem parte da banca examinadora e por proporcionarem significativas contribuições na estrutura da dissertação.

Aos colegas Welson, Fabio Matos, Alisson, Lucas e Roque pela amizade e grandes incentivos.

Aos colegas de república: André, Danilo, João e Paulo pela amizade e descontração.

Aos professores Liovando (Manejo de Solos) e Carlos Ernesto (Gênese e Classificação de solos) pela contribuição na coleta de solo e pelo apoio fornecido.

Ao Dr. Eugênio da Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, por suas várias formas de contribuição.

BIOGRAFIA

MARCELO ROCHA DOS SANTOS, filho de Manoel Messias dos Santos e Cleuza Rocha dos Santos, nasceu na cidade de Rio do Pires, BA, em 23 de Maio de 1979.

Em março de 1996, iniciou seus estudos no curso de Magistério, nível médio, em sua terra natal, concluindo-o em dezembro 1998. Em 1999, trabalhou na rede municipal de ensino.

Em 2001, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal da Bahia, em Cruz das Almas, BA, concluindo-o em agosto de 2006. Durante três anos e meio desse período, estagiou na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA – CNPMF) na área de irrigação, com ênfase na fertirrigação do mamoeiro e bananeira, sendo três anos como bolsista PIBIC/ CNPq. Estagiou seis meses na Sociedade de Estudos dos Ecossistemas e Desenvolvimento Sustentável (SEEDs), atuando nos estudos de viabilidade econômica de sistemas Agroflorestais.

Em Outubro de 2006, iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Recursos Hídricos, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa da dissertação em Julho de 2008.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Fertirrigação.....	3
2.2. Uso do nitrogênio na fertirrigação	5
2.3. Uso do fósforo na fertirrigação.....	6
2.4. Monitoramento da composição iônica do solo	8
2.4.1. Modelos matemáticos que relacionam condutividade elétrica da solução do solo, condutividade elétrica do solo e teor de água	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1. Coleta e preparo do solo.....	13
3.2. Características dos solos usados no experimento.....	14
3.3. Calibração de sondas de TDR.....	16
3.4. Calibração de modelos matemáticos que relacionam CE_{ss} , CE_s e teor de água.....	17
3.5. Determinação dos parâmetros de transporte do fósforo e nitrato no solo	19
3.6. Experimento de fertirrigação.....	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1. Modelos matemáticos para determinar o teor de água condutividade elétrica da solução do solo e a concentração do fósforo e do nitrato	24

4.1.1. Modelos para estimativa de condutividade elétrica da solução do solo ..	24
4.1.2. Modelos para estimativa da concentração do fósforo e nitrato com valores de CE_s e θ	28
4.2. Parâmetros de transporte do fósforo e nitrato	31
4.3. Distribuição de água, fósforo, nitrato e condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico	32
4. 4. Distribuição de água, fósforo, nitrato e condutividade elétrica no Latossolo Vermelho	40
5. CONCLUSÕES	47
6. RECOMENDAÇÕES.....	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
APÊNDICE	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidade
α	Parâmetro de ajuste da equação de Mualen et al., (1995)	
β	Parâmetro de ajuste da equação de Heimovaara et al., (1995)	
δ	Parâmetro empírico da equação de Nadler (1984)	
θ	Teor de água	$L^3 L^{-3}$
Θ	Saturação efetiva do solo	
θ_r	Teor de água residual	$L^3 L^{-3}$
θ_s	Teor de água na saturação	$L^3 L^{-3}$
θ_{ws}	Água higroscópica do solo	$L^3 L^{-3}$
λ	Parâmetro do modelo de Brooks & Corey	
ρ	Coefficiente de reflexão	
ρ_p	Massa específica das partículas	$M L^{-3}$
ρ_s	Massa específica do solo	$M L^{-3}$
ϕ_s	Fração volumétrica ocupada pelos sólidos do solo	
a	Parâmetro de ajuste da equação de Rhoades (1976)	
b	Parâmetro de ajuste da equação de Rhoades (1976)	
c	Parâmetro de ajuste da equação de Rhoades et al., (1989)	
CE_{fs}	Condutividade elétrica da fração sólida do solo	ΩL^{-1}
CE_s	Condutividade elétrica do solo	ΩL^{-1}
CE_{ss}	Condutividade elétrica da solução do solo	ΩL^{-1}
C_i	Concentração do nutriente	$M V^{-1}$
$C_{iNO_3^-}$	Concentração do nitrato na solução do solo	$M V^{-1}$
C_{iP}	Concentração do fósforo na solução do solo	$M V^{-1}$
d	Parâmetro de ajuste da equação de Rhoades et al., (1989)	
D	Coefficiente dispersivo-difusivo	$L^2 T^{-1}$
e	Parâmetro de ajuste da equação de Vogeler et al., (1996)	
f	Parâmetro de ajuste da equação de Vogeler et al., (1996)	
F_T	Fator de Correção da CE_s quanto ao efeito da temperatura	

F_{θ}	Fator de correção quanto a tortuosidade do fluxo da corrente elétrica	
g	Parâmetro de ajuste da equação de Vogeler et al., (1996)	
h	Parâmetro de ajuste da equação de Vogeler et al., (1996)	
K_a	Constante dielétrica	
K_d	Coefficiente de partição	$L^3 M^{-1}$
K_p	Constante geométrica da sonda	
m	Parâmetro de ajuste da equação de Heimovaara et al., (1995)	
P	Número de Peclet	
q	Parâmetro de ajuste da equação de Heimovaara et al., (1995)	
R	Fator de retardamento	
T	Temperatura do solo	$^{\circ}C$
V_0	Amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR	L
V_1	Amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda	L
Z_u	Impedância no cabo coaxial usado nas sondas de TDR	Ω

RESUMO

SANTOS, Marcelo Rocha dos, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2008. **Uso da reflectometria no domínio do tempo para avaliar a distribuição de nitrato e fósforo em colunas de solos fertirrigados.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Co-orientadores: Antonio Teixeira de Matos e Rubens Alves de Oliveira.

A fertirrigação é uma técnica que tem sido usada, em ritmo crescente, por produtores agrícolas, devido às suas vantagens. Podendo destacar entre elas o uso mais eficiente dos nutrientes pelas culturas e a possibilidade de parcelar, de forma mais adequada, as doses de nutrientes. O correto manejo da fertirrigação demanda o conhecimento da composição iônica do solo, o que tem sido determinado por amostragem de solo, extrato da pasta saturada e extrator de solução. Atualmente, a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) permite o monitoramento da composição iônica do solo em tempo real, de forma contínua, precisa e com menos distúrbios do solo. Ainda são escassas, na literatura, pesquisas no âmbito da distribuição no solo dos íons oriundos da fertirrigação realizada em diferentes momentos durante a irrigação. Objetivou-se assim, avaliar a distribuição de fósforo e nitrato, com uso da TDR, em colunas de Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho submetidas a diferentes momentos de aplicação da fertirrigação durante a irrigação. O experimento foi conduzido em laboratório, onde foram realizadas fertirrigações em colunas de solo de 0,66 m de comprimento e 0,148 m de diâmetro, nos quais foram determinados os teores de água e as condutividades elétricas do solo, com uso da TDR. Usou-se dois tipos de solos (Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho), dois nutrientes (fósforo e nitrato) e três diferentes momentos de aplicação do fertilizante durante a irrigação (início, meio e fim), sendo que, para cada combinação de solo e nutriente, usou-se três repetições. Foram ajustados modelos

que relacionam a condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) com a concentração do nutriente e modelos que relacionam a condutividade elétrica da solução do solo com o teor de água (θ) e a condutividade elétrica do solo (CE_s). Estes modelos foram conjugados e utilizados para determinar as concentrações dos nutrientes nas colunas usando a TDR. Para determinação de θ e de CE_s , foram instaladas sondas de TDR de 3 a 57 cm de profundidade, distanciadas de 9 cm entre si, e, por meio de um datalogger, os valores de θ e CE_s foram registrados, continuamente, durante a irrigação, a fertirrigação e a redistribuição de água no solo. O modelo que melhor se ajustou aos dados de CE_{ss} , CE_s e θ foi o de Vogeler et al. (1996) seguido pelo modelo de Rhoades (1976) para ambos os solos e fertilizantes aplicados. Na fertirrigação com fosfato monoamônico (MAP), o fósforo ficou adsorvido nos 12 primeiros cm de profundidade no Neossolo Quartzarênico, quando a aplicação foi realizada no início e no meio da irrigação. Por outro lado, quando a fertirrigação foi realizada nesse solo, no final da irrigação, e no início da irrigação no Latossolo Vermelho, o fósforo não atingiu os 3 cm de profundidade. Na fertirrigação com nitrato de cálcio no Neossolo Quartzarênico, o nitrato atingiu as profundidades de 30, 21 e 12 cm quando se realizou as fertirrigações no início, meio e final da irrigação, respectivamente. No Latossolo Vermelho, o nitrato ficou retido nos 12 primeiros cm de profundidade independentemente do momento da fertirrigação. Pode-se concluir que a distribuição do fósforo no Latossolo Vermelho não foi influenciada pelo momento da fertirrigação com MAP, enquanto, para o nitrato, há grande influência, principalmente no Neossolo Quartzarênico.

ABSTRACT

SANTOS, Marcelo Rocha dos, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, July 2008. **Use of time domain reflectometry to evaluate the nitrate and phosphorous distribution in fertirrigated soil columns.** Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Co-advisers: Antonio Teixeira de Matos and Rubens Alves de Oliveira.

Fertirrigation is a technique that has been increasingly used, by agricultural producers due to its advantages. As the more efficient use of the nutrients by the crops and the possibility in parceling out, in a more appropriate way, the doses of nutrients. The correct handling of fertirrigation requires knowledge of the ionic composition of the soil, which has been determined by sampling, saturation paste extract and solution extractor. Presently, the Time Domain Reflectometry technique (TDR) allows to monitor the soil ionic composition in real time, in a continuous and precise form and with less soil disturbances. Research on the context of soil ion distribution from fertirrigation carried out in different moments during irrigation is still scarce in literature. So, the aim was to evaluate the distribution of phosphorous and nitrate, with the use of TDR, in columns of Quartzarenic Neosol (Quartzpsamments) and Red Latosol (Red Oxisol – Acrortox) submitted to different moments of application of fertirrigation during irrigation. The experiment was conducted in a laboratory, where fertirrigation was done in soil columns, having 0.66 m length and 0.148 m in diameter, in which the water content and the bulk electric conductivity of the soil was determined using TDR. It was used two soil types (Quartzarenic Neosol and Red Latosol), two nutrients (phosphorous and nitrate) and three different moments of application of the fertilizer during irrigation (beginning, middle and end), being that, for each soil and nutrient combination, it was used three repetitions. Models that relate the soil solution electrical conductivity (CE_{ss}) with the concentration

of the nutrients and models that relate the soil solution electrical conductivity with the water content (θ) and the bulk electrical conductivity in soil (CE_s) were adjusted. These models were combined and used to determine the concentrations of the nutrients in the columns using TDR. In order to determine the θ and CE_s , TDR probes were installed from 3 to 57 cm in depth, distanced 9 cm from each other. Using a datalogger the values of θ and CE_s were recorded continuously during the irrigation, the fertirrigation and the redistribution of water in soil. The models that best fit the CE_{ss} , CE_s and θ data was the one developed by Vogeler et al. (1996) followed by the one by Rhoades (1976), for both soils and applied fertilizers. In the fertirrigation with monoamonic phosphate (MAP), the phosphorous was adsorbed in the first 12 cm of depth in the Quartzarenic Neosol when the application was made at the beginning and in the middle of the irrigation. On the other hand, when the fertirrigation was carried out at the end of the irrigation in these soil and at the beginning of the irrigation in Red Latosol, the phosphorous did not even reach 3 cm in depth. In the fertirrigation with calcium nitrate in Quartzarenic Neosol, the nitrate reached depths of 30, 21 and 12 cm when the fertirrigation was carried out at the beginning, middle and end of the irrigation, respectively. In the Red Latosol, the nitrate remained in the first 12 cm independent of the fertirrigation moment. It can be concluded that the phosphorous distribution in the Red Latosol wasn't influenced by the moment of the fertirrigation with MAP, but for nitrate there is a great influence mainly in Quartzarenic Neosol.

1. INTRODUÇÃO

Nos tempos atuais, tem-se percebido amplo avanço no uso da irrigação localizada, principalmente em regiões semi-áridas, o que tem possibilitado o uso racional de água e a prática da fertirrigação. Coelho (2005a) ressalta que o uso da fertirrigação tem crescido substancialmente nos pólos de agricultura irrigada, devido às vantagens inerentes da técnica. Destaca-se, na fertirrigação, o uso mais eficiente dos nutrientes pelas culturas, a possibilidade em parcelar, de forma mais adequada, as doses de nutrientes, a redução da mão de obra, a melhoria na conservação do solo, além de acrescentar pouco no custo de um sistema de irrigação.

Entre os nutrientes mais usados na fertirrigação distingue-se o nitrogênio, pelo motivo de grande demanda pelas plantas, pela mobilidade no solo e a disponibilidade de muitas fontes solúveis em água (RIBEIRO et al., 1999), além de ser um dos elementos minerais requeridos em maior quantidade pelas plantas e que mais limita o crescimento (FERNANDES, 2006).

Embora exigido em quantidades menores do que o nitrogênio e o potássio, o fósforo é o nutriente que mais afeta a produtividade de culturas na maioria dos solos. Segundo Ribeiro et al. (1999), o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfato diamônico (DAP) são os fertilizantes sólidos mais usados, via água de irrigação, para o fornecimento de P às plantas.

Reichardt & Timm (2004) ressaltam que, em muitas partes do planeta, doses excessivas de fertilizantes têm sido utilizadas, sobretudo de N, sendo a resposta na produtividade compensadora, embora as quantidades aplicadas têm sido eventualmente exageradas. Em extensas regiões do planeta, as águas subterrâneas acham-se impróprias para uso humano, devido à alta concentração de NO_3^- . Merece chamar atenção aqui, para o que está ocorrendo na cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte, onde muitos locais da cidade estão recebendo água contaminada por nitrato. Isto porque a maioria da água que chega às residências é extraída do subsolo (do aquífero que está contaminado por nitrato), através de poços perfurados. Dos 134 poços em atividade, 69 apresentam contaminação por nitrato. Há poços, em que a concentração de nitrato na água chega a apresentar 30 mg L^{-1} , concentração

esta, três vezes maior do que o padrão admitido pela Portaria 518/04 do Ministério da Saúde. Por essa razão, estudos direcionados para o monitoramento da dinâmica de solutos no solo, assim como, sob áreas fertirrigadas, são de fundamental importância. Sob áreas fertirrigadas, o conhecimento da dinâmica de íons no solo é necessário para a sustentabilidade dos recursos de solo e água (COELHO et al., 2005b). De acordo com Santana (2006), o monitoramento da variação espacial e temporal no teor de água (θ), da condutividade elétrica do solo (CE_s), da condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e da concentração iônica (C_i), permite estimar a perda de água por percolação profunda, a evapotranspiração da cultura, a determinação de regiões de extração de nutrientes e possível perda de nutrientes por lixiviação, dentre outros. O autor ainda ressalva que a crescente conscientização da necessidade de uso racional dos recursos naturais e, ou, produtivos, especialmente a água, aliada ao avanço da eletrônica, tem contribuído para a intensificação dos estudos direcionados para o monitoramento de água no solo.

O monitoramento de íons no solo sob áreas fertirrigadas é, geralmente, realizado com a utilização de extratores de solução, amostragem do solo e extrato da pasta saturada do solo.

Os extratores apresentam algumas dificuldades em termos de representatividade amostral. Estes extraem solução a potenciais mais altos e, uma vez, contendo solução no interior, há a necessidade de retirada da solução para se aplicar outra sucção. Ao contrário, a solução pode passar próxima à cápsula e não ser coletada pelo mesmo. Ao instalar o extrator no solo, pode haver coincidência da cápsula porosa do extrator ficar próxima a caminhos preferenciais que permitam a entrada de solução neste, antes mesmo da solução, no seu deslocamento normal no meio poroso, alcançar a profundidade que deseja extrair a solução.

A amostragem do solo requer maior tempo para análise e é um processo destrutivo. O extrato da pasta saturada não representa a composição iônica do solo em tempo real. Atualmente, há outras técnicas, como a reflectometria no domínio do tempo (TDR), que permite esse monitoramento em tempo real, de forma contínua e precisa, mantendo-se a estrutura do solo.

Com a utilização da TDR pode-se, ao mesmo tempo, determinar, num dado local do solo, o teor de água e a condutividade elétrica (CE_s), o que abre caminho para a realização de inferências sobre a condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) e a concentração de um dado nutriente aplicado (C_i). Isto é possível porque, há uma relação entre condutividade elétrica da solução do solo com teor de água e condutividade elétrica do solo e, há também, relação entre condutividade elétrica da solução do solo e concentração do nutriente. Dessa forma, pode-se calibrar modelos que relacionam CE_{ss} com CE_s e θ e, modelos que relacionam CE_s e C_i , estes modelos podem ser conjugados, resultando num modelo único que relaciona C_i com CE_s e θ .

Diante do exposto, torna-se relevante a existência de mais estudos relacionados com a dinâmica de íons no solo sob fertirrigação, o que permite tomada de decisões ao empregar medidas que minimizem problemas relativos a impactos ambientais e socioeconômicos. Portanto, objetivou-se com a realização deste trabalho avaliar, em laboratório, a distribuição de fósforo e nitrato em colunas de solos arenoso e argiloso fertirrigadas com fosfato monoamônico e nitrato de cálcio, aplicados nos terços inicial, médio e final da irrigação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fertirrigação

A aplicação de fertilizantes via água de irrigação, prática denominada de fertirrigação, é empregada na agricultura irrigada, constituindo-se no meio mais eficiente de nutrição mineral de plantas, pois combina dois fatores essenciais para o crescimento, desenvolvimento e produção das plantas: água e nutrientes (BORGES et al., 2006). A fertirrigação objetiva o uso racional dos fertilizantes na agricultura irrigada. Entre as vantagens da fertirrigação, podem ser destacados (FRIZZONE et al., 1985 apud COELHO et al., 2004): a) minimização do trabalho de aplicação do fertilizante; b) economia e comodidade de aplicação; c) distribuição e localização do

fertilizante mais próximo de raízes da planta; d) aplicação ajustada às diferentes etapas de desenvolvimento das plantas; e) eficiência de uso e economia de fertilizantes; e) controle na profundidade de aplicação; f) melhor controle na quantidade aplicada; g) favorecimento na aplicação de micronutrientes; e h) preservação da qualidade das águas subterrâneas quando há manejo correto da fertirrigação. Entre as limitações destacam-se: a) risco de contaminação de água potável ao adotar metodologia inadequada ao injetar o fertilizante no sistema e, também devido ao mau manejo da fertirrigação; b) não ser aplicável a todo tipo de fertilizante; c) possibilidade de entupimento dos emissores de água; d) corrosão de tubulações e emissores; e) necessidade de mão-de-obra qualificada para sua operação; f) incompatibilidade entre diferentes formas de fertilizantes.

Coelho et al. (2003) afirmam que, mesmo trazendo consigo a atividade de aplicação de adubos via água, a irrigação vem sendo usada pelos fruticultores sem metodologia adequada, sendo, então, realizada com base em recomendações empíricas. Tal situação tem conduzido a diversas conseqüências indesejáveis tais como: produtividade e qualidade abaixo das potencialidades das culturas fertirrigadas, redução na vida útil dos equipamentos, tanto no que se refere aos dispositivos injetores de fertilizantes, como no sistema de irrigação em si e, principalmente, a degradação física e química dos solos, devido às alterações no pH e no teor de sais; contaminação da fonte de água de irrigação ou do lençol freático sob a área irrigada.

Coelho et al. (2004) ressaltam que a fertirrigação é compatível com os métodos de irrigação pressurizada, ou seja, irrigação por aspersão e irrigação localizada. Podendo também, ser usada com a irrigação por superfície, incluindo sulcos, faixas e bacias. É uma tecnologia que se adéqua melhor aos sistemas localizados que funcionam sob baixa pressão, alta freqüência de irrigação e condicionam a aplicação da solução de fertilizantes dentro ou próximo da zona radicular.

Segundo Coelho et al. (2004), a fertirrigação pode ser dividida em duas fases: a fase de injeção dos nutrientes, que ocorre no sistema de irrigação, e a fase do

escoamento dos solutos no solo, que inclui movimento, redistribuição e absorção dos nutrientes pelo sistema radicular.

2.2. Uso do nitrogênio na fertirrigação

Entre os nutrientes mais usados na fertirrigação, distingue-se o nitrogênio, pelo motivo de grande demanda pelas plantas, mobilidade no solo e disponibilidade de muitas fontes solúveis em água (RIBEIRO et al., 1999). Segundo Coelho et al. (2004), o nitrogênio é o nutriente mais aplicado em fertirrigação, pois o seu parcelamento é recomendado em razão da alta mobilidade no solo (principalmente solos arenosos), do alto índice salino dos adubos que o contém e da baixa exigência inicial das culturas.

O nitrogênio pode ser aplicado via água de irrigação a partir de diferentes fontes, sendo que, se aplicado como uréia, deve-se levar em conta que esta reagirá com a água (hidrólise) formando amônia (NH_3) e gás carbônico (CO_2), pela ação da enzima urease, se a mesma estiver presente no solo. Da hidrólise resulta o íon amônio (NH_4^+), que vai ser adsorvido pelos colóides ou partículas eletricamente carregadas (negativamente) do solo (COELHO et al., 2004).

A mineralização de compostos orgânicos nitrogenados ocorre, essencialmente, por meio de três reações sucessivas: aminação, amonificação e nitrificação, que levam o nitrogênio até a forma nítrica (NO_3^-), sendo esta a forma preferencialmente absorvida pelas plantas (TISDALE et al., 1985 apud BARROS, 2005). As reações podem ser descritas da seguinte maneira (DIAS et al., 1992):

Aminação

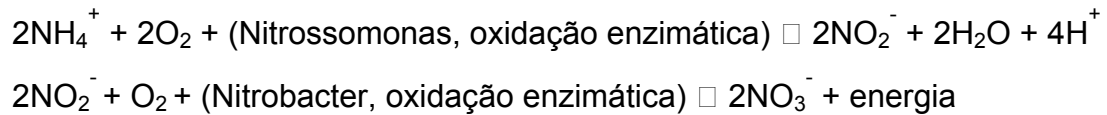
Proteínas + compostos afins + digestão enzimática \square $\text{R-NH}_2 + \text{CO}_2 + \text{energia}$
+ outros produtos

Amonificação

$\text{R-NH}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{hidrólise enzimática} \square \text{NH}_3 + \text{R} + \text{OH} + \text{energia}$

$2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \square (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 \square 2\text{NH}_4^+ + \text{CO}_3^{2-}$

Nitrificação



O movimento do íon amônio (NH_4^+) dependerá da concentração do mesmo e da capacidade de troca catiônica do solo (CTC). Se a CTC do solo for alta, o solo reterá quantidades significativas de íons amônio. Estes íons serão transformados em nitrato (NO_3^-) no solo (reação descrita anteriormente), após a aplicação da uréia, sob temperaturas entre 25 e 30 °C. Os nitratos se movem junto com a frente de avanço da água, no volume molhado. Dessa forma, após a transformação do amônio em nitrato, sucessivas irrigações podem levar esses íons para as bordas do volume molhado, uma vez que os íons nitrato, em razão de possuírem igual sinal de carga, não são adsorvidos em sítios de carga negativa do solo, além de serem altamente solúveis em água. Assim, conclui-se que, dentre os fertilizantes nitrogenados, a uréia é o que pode resultar em maior mobilidade do nitrogênio no solo, em razão de pequena retenção de seus subprodutos no solo. Caso a irrigação seja feita de forma a gerar perda por percolação, certamente haverá lixiviação de nutrientes (COELHO et al., 2004), notadamente do nitrogênio, aplicados no solo.

Cantarella (2007) ressalta que a predominância de cargas negativas no solo ou, pelo menos, nas camadas menos profundas dos solos tropicais, e a baixa interação química do NO_3^- com os minerais do solo, fazem com que o NO_3^- esteja sujeito à lixiviação para camadas mais profundas, podendo atingir o lençol freático com o potencial de se tornar um contaminante do ambiente.

2.3. Uso do fósforo na fertirrigação

Embora exigido em quantidades menores do que o nitrogênio e o potássio, o fósforo é o nutriente que mais limita a produtividade de culturas na maioria dos solos. Apenas solos de alta fertilidade não necessitam de adubações fosfatadas nos primeiros anos de cultivo. De qualquer maneira, é bastante claro que deva haver

constante reposição do fósforo em solução, o que se dá por meio da dissolução do fósforo lábil que está em equilíbrio com o fósforo em solução (RAIJ, 1991).

Apesar do teor total de fósforo no solo variar de 200 a 3.000 mg kg⁻¹ (NOVAIS & SMYTH, 1999), menos de 0,1 % desse total está presente na solução do solo, cujos valores variam entre 0,002 e 2,0 mg L⁻¹ (FARDEAU, 1996 apud ROLIM NETO, 2002).

A interação do P com os constituintes do solo, com o Al, Fe e Ca, sua ocorrência em formas orgânicas e sua lenta taxa de difusão na solução tornam-no menos prontamente disponível na rizosfera. Mesmo quando são aplicados fertilizantes, a maior parte do P adicionado é adsorvida em colóides do solo, tornando-se com o tempo, não-disponível, dada à formação de compostos de baixa solubilidade, sem propiciar uma esperada contribuição para a produção vegetal (FERNANDES, 2006).

A adubação fosfatada apresenta efeito residual de longa duração, pois a movimentação do nutriente no perfil do solo é pequena, até mesmo em solos mais arenosos (COELHO et al., 2004).

A fertirrigação por gotejamento pode aumentar o movimento de P no solo, se comparado à aplicação na forma sólida no solo. O movimento é maior na fertirrigação porque maior concentração em uma faixa estreita do solo satura mais rapidamente os sítios de fixação de P próximos ao ponto de aplicação do fertilizante. O movimento de P no solo aumenta com a taxa de aplicação deste e também com o raio de molhamento (BORGES, COELHO & TRINDADE, 2002).

De acordo com Ribeiro et al. (1999), o fosfato monoamônico (MAP) e o fosfato diamônico (DAP) são os fertilizantes sólidos mais usados para aplicação via água de irrigação com o objetivo de fornecimento de P às plantas. Devido à baixa solubilidade dos compostos de fósforo no solo e à tendência de ocorrência de equilíbrio em favor da fase sólida, a quantidade de fósforo na solução do solo se torna reduzida (HOLFORD, 1997). Para prevenir a deficiência deste nutriente, torna-se necessária a aplicação de grande quantidade de fósforo no solo (ROSSI et al., 1999). Yamada (2004) relata que os teores de fósforo na solução dos solos das regiões de Cerrados são geralmente muito baixos. Essa característica, associada à alta capacidade que

esses solos têm em reter o P na fase sólida, é a principal limitação, quando não é feita, para o desenvolvimento de certas atividades agrícola rentáveis.

2.4. Monitoramento da composição iônica do solo

Vários são os métodos usados no monitoramento da concentração de sais do solo. Silva et al. (2005) ressaltam que o monitoramento dos íons a partir de análise do solo tem como inconvenientes a necessidade de amostras destrutivas e a demora na obtenção dos resultados. As determinações feitas a partir do extrato de saturação não representam a composição iônica do solo em tempo real. O monitoramento de íons com o extrator de solução permite a repetição de determinações no mesmo local de amostragem, mas contempla apenas regiões com a água retida sob potenciais mais altos.

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tem se mostrado como uma ferramenta eficiente para realizar a medida simultânea do teor de água (θ) e da condutividade elétrica do solo (CE_s) em tempo real, de forma contínua, precisa e com o mínimo de perturbações na estrutura do solo. A condutividade elétrica do solo (CE_s) varia com a condutividade elétrica da fração sólida do solo (CE_{fs}) com o teor de sais e com o teor de água (θ) que, por sua vez interfere na condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}). É necessário, no entanto, viabilizar o uso desta técnica para possibilitar estudos de monitoramento de íons no solo, o que pode ser obtido relacionando-se a concentração de íons (C_i) com CE_{ss} e esta com CE_s e θ . Wraith e Das (1998) ressaltam que devido à relação entre a CE_s e CE_{ss} e entre CE_{ss} e C_i , a TDR pode auxiliar no monitoramento da distribuição de íons no solo, sob condições de campo.

Para aplicação da TDR no monitoramento da distribuição de íons no solo, se torna necessário a calibração de alguns modelos que, ao serem conjugado um com o outro, possibilitam a estimativa da concentração iônica. Rhoades (1976); Nadler (1984); Rhoades et al. (1989); Mualen et al. (1991); Heimovaara et al. (1995); Vogeler et al. (1996) e outros propuseram modelos que relacionam condutividade elétrica da solução do solo com valores de teor de água e condutividade elétrica do

solo. Estes modelos podem ser calibrados para cada tipo de solo e nutriente aplicado para estimar a CE_{ss} em função de CE_s e θ . Desta forma, é possível, com o uso da TDR, ter conhecimento da CE_{ss} , uma vez que são facilmente obtidas pela TDR as variáveis CE_s e θ .

Existe relação entre condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) e concentração iônica (C_i). Portanto, pode gerar uma regressão com CE_{ss} em função C_i , em ensaio laboratorial e, nesse mesmo experimento determinar CE_s e θ com uso da TDR, possibilitando a calibração dos modelos que relacionam CE_{ss} , CE_s e θ . Desta forma, com base em modelos que relacionam CE_{ss} e C_i , e, modelos que relacionam CE_{ss} , CE_s e θ , a TDR tem utilidade na estimativa da concentração iônica.

2.4.1. Modelos matemáticos que relacionam condutividade elétrica da solução do solo, condutividade elétrica do solo e teor de água

Vários modelos matemáticos têm sido usados para estimar CE_{ss} em função de θ e da CE_{ss} , sendo estes apresentados a seguir, os mais usuais.

Modelo 1 - Rhoades (1976):

$$CE_{ss} = \frac{CE_s - CE_{fs}}{a\theta^2 + b\theta} \quad (1)$$

em que,

CE_{ss} = condutividade elétrica na solução do solo;

CE_s = condutividade elétrica do solo;

CE_{fs} = condutividade elétrica na fração sólida do solo;

θ = teor de água no solo ($m^3 m^{-3}$), e

“a” e “b” = parâmetros de ajustes da equação.

Modelo 2 - Nadler (1984):

$$CE_{ss} = F_T (CE_s - \delta CE_{fs}) F_\theta \quad (2)$$

em que,

F_T = fator de correção da CE_s quanto ao efeito da temperatura (adimensional)

δ = parâmetro empírico

F_θ = fator de correção quanto à tortuosidade do fluxo de corrente elétrica (adimensional)

Os valores de F_T , δ e F_θ são obtidos utilizando-se as equações, 3, 4 e 5, respectivamente:

$$F_T = 1 + \frac{(25 - T)}{49,7} + \frac{(25 - T)^2}{3728}, \text{ para } 20 \leq T \leq 47^\circ C \quad (3)$$

$$\delta = \frac{(\phi_s + \theta_{ws})^2}{\phi_s} \quad (4)$$

$$F_\theta = \frac{1}{(\theta - \theta_{ws})} \quad (5)$$

em que,

T = temperatura do solo ($^\circ C$);

ϕ_s = fração volumétrica ocupada pelos sólidos no solo, obtida pela relação entre a massa específica do solo e a massa específica das partículas;

θ_{ws} = água higroscópica no solo ($cm^3 cm^{-3}$), corresponde o teor de água adquirido por uma amostra de solo seco ao ar depois de ser submetida a um ambiente com 100% de teor de água relativa do ar. Diferenciando do teor de água residual, que é a quantidade de água contida em uma amostra de solo seco ao ar e depois de ser seca em estufa à temperatura e $105^\circ C$.

Modelo 3 - Rhoades et al. (1989):

$$CE_{ss} = \frac{CE_s - \left[\frac{(\phi_s + c\theta + d)^2}{\phi_s} \right]}{[\theta - (c\theta + d)]} \quad (6)$$

em que,

“c” e “d” são parâmetros de ajuste da equação.

Modelo 4 - Mualen et al. (1991):

$$CE_{ss} = \frac{CE_s - CE_{fs}}{\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\alpha} \quad (7)$$

em que,

α = parâmetro de ajuste da equação

Modelo 5 - Heimovaara et al. (1995):

$$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{q}})^q \right]}{(\theta - \theta_r)^{\beta+1} \left[1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{m}})^m \right]^2} \quad (8)$$

em que,

θ_r = teor de água residual ($m^3 m^{-3}$);

Θ = saturação efetiva do solo;

“ q ”, “ m ” e “ β ” = parâmetros de ajuste da equação.

A saturação efetiva do solo é obtida utilizando-se a equação 9

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

em que,

θ_s = teor de água na saturação ($m^3 m^{-3}$) determinado utilizando-se a equação

10

$$\theta_s = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \quad (10)$$

em que,

ρ_s = massa específica do solo ($g cm^{-3}$) e

ρ_p = massa específica das partículas do solo ($g cm^{-3}$)

Modelo 6 - Vogeler et al. (1996):

$$CE_{ss} = \frac{CE_s - (e\theta - f)}{(g\theta - h)} \quad (11)$$

em que,

“e”, “f”, “g” e “h” são parâmetros de ajuste da equação.

Nas equações 2 e 6, as unidades de CE_s e CE_{ss} estão em $S\ m^{-1}$, nas demais em $dS\ m^{-1}$.

Apenas o modelo de Nadler (1984) tem, em si, o fator da correção da CE_s quanto ao efeito da temperatura para 25 °C. Nos demais modelos, a CE_s deve ser corrigida, antes de ser usada nos mesmos, multiplicada pelo fator de correção determinado utilizando-se a equação 3.

Os modelos de Rhoades (1976) e Vogeler et al. (1996) são os que têm melhor correlacionado CE_s , CE_{ss} e θ (SANTANA et al., 2004; COELHO et al., 2004).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV, onde foram realizadas fertirrigações em colunas de solo e determinadas, com o uso da TDR, as distribuições do teor de água e das concentrações de nitrato e fósforo.

Na execução do experimento, utilizaram-se, duas classes de solos (Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho), duas fontes de fertilizantes (MAP e nitrato de cálcio) e três diferentes momentos de aplicação do fertilizante durante a irrigação (início, meio e fim). Para cada combinação de solo com fertilizante e com momento de aplicação, foram feitas três repetições.

3.1. Coleta e preparo do solo

As amostras de Neossolo Quartzarênico utilizados para o enchimento das colunas, foram coletadas nas proximidades da Fazenda Experimental da EPAMIG, à latitude de 15°32'S e longitude de 043°46'W, em Mocambinho, no município de Jaíba, MG, e de um Latossolo Vermelho Ácrico típico, ocorrente na região do Alto Paranaíba, próximo à cidade de Rio Paranaíba, MG à latitude de 19° 21' S e longitude de 046° 07' W. O Neossolo Quartzarênico foi retirado nos primeiros 40 cm de profundidade, enquanto o Latossolo Vermelho foi retirado de uma camada compreendida entre 50 a 120 cm de profundidade, a qual corresponde aos horizontes Bw1 e Bw2 (ROLIM NETO, 2002), por apresentar característica de eletropositividade. As amostras de solos coletadas foram levadas ao Laboratório de Física do Solo, onde foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2,0 mm. Partes destas amostras foram utilizadas para determinação das características físico-hídricas (textura, massa específica do solo, massa específica das partículas, macro e microporosidade, condutividade hidráulica, retenção de água a -6, -10, -30, -100, -500 e -1500 kPa) e químicas (pH, teores de fósforo (P) e de potássio (K) disponível, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio trocáveis (Al), acidez potencial (H+Al); soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V %), índice de saturação de alumínio (m) e teor de matéria orgânica (MO).

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo no Departamento de Solos da UFV, onde foi usada a metodologia proposta por Ruiz (2005), para análises granulométricas e os métodos relacionados pela EMBRAPA (1997) para as demais determinações físicas e físico-hídricas apresentadas neste trabalho. As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Rotina de análises químicas do Departamento de Solos da UFV, de acordo com os métodos apresentados em Defelipo & Ribeiro (1997).

As curvas características de retenção de água foram usadas para determinar os parâmetros do modelo de Brooks e Corey, usando o programa computacional RETC (van Genuchten et al., 1991).

3.2. Características dos solos usados no experimento

As características físico-hídricas e químicas do Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho usados nessa pesquisa estão mostradas na Tabela 1. Observa-se que o Neossolo Quartzarênico apresenta 0,87 kg kg⁻¹ de areia, refletindo assim, baixa retenção de água, enquanto, o Latossolo Vermelho apresenta 0,95 kg kg⁻¹ de silte mais argila, os quais por serem partículas mais finas, possuem maior capacidade de retenção de água.

Tabela 1. Características físico-hídricas e químicas do Neossolo Quartzarênico (RQ) e Latossolo Vermelho (LV)

	Características físico-hídricas		Características químicas	
	RQ	LV	RQ	LV
Areia Grossa (kg kg ⁻¹) ¹	0,63	0,20	pH em água	5,34 5,01
Areia Fina (kg kg ⁻¹) ¹	0,24	0,30	pH em KCl	4,38 5,45
Silte (kg kg ⁻¹) ²	0,20	0,11	P (mg dm ⁻³)	2,10 0,50
Argila (kg kg ⁻¹) ²	0,11	0,84	K (mg dm ⁻³)	46,0 10,0
Massa específica do solo (kg dm ⁻³) ³	1,49	1,07	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,76 0,09
Massa específica das partículas (kg dm ⁻³) ⁴	2,73	2,53	Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,10 0,00
Retenção de água a -10 kPa (cm ³ cm ⁻³) ⁵	0,09	0,39	Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,19 0,00
Retenção de água a -1.500 kPa (m ³ m ⁻³) ⁵	0,05	0,29	H+Al (cmol _c dm ⁻³)	1,10 3,00
Porosidade (m ³ m ⁻³) ⁶	0,45	0,58	SB (cmol _c dm ⁻³)	0,98 0,12
Macroporosidade (m ³ m ⁻³) ⁷	0,36	0,16	CTC (t) (cmol _c dm ⁻³)	1,17 0,12
Microporosidade (m ³ m ⁻³) ⁸	0,09	0,42	CTC (T) (cmol _c dm ⁻³)	2,08 3,12
Condutividade Hidráulica (cm h ⁻¹) ⁹	52,81	28,35	V (%)	47,10 3,80
			m (%)	16,20 0,00
			Matéria orgânica (dag kg ⁻¹)	0,78 1,94
			P-rem (mg L ⁻¹)	41,9 3,6

¹ Por peneiramento

² Método da Pipeta

³ Método da proveta e anel volumétrico para S1 e S2 respectivamente

⁴ Método do balão volumétrico

⁵ Equipamento de placa porosa

⁶ Calculada: $PT = 1 - \rho_s / \rho_p$

⁷ Por diferença: $P_{MACRO} = P_{TOTAL} - P_{MICRO}$

⁸ Mesa de tensão

⁹ Em meio saturado, permeação de carga constante

P – Na – K – Extrator Mehlich 1

Ca – Mg – Al – Extrator: KCl – 1 mol.L⁻¹

H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L - pH 7,0

SB = Soma de Bases

CTC (t) – Capacidade de Troca Catiônica Efetiva

CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0

V = Índice de Saturação de Bases

m = Índice de Saturação de Alumínio

Mat. Org = C. Org x 1,724 – Walkley-Black

P-rem = Fósforo Remanescente

Verificam-se na Tabela 1 valores de CTC (T) de 2,08 e 3,12 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para o Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho, respectivamente. Estes valores de CTC potencial baixos são devido ao predomínio de areia no Neossolo Quartzarênico e pelo motivo do Latossolo Vermelho ser bastante intemperizado, apresentando predomínio de argila do tipo 1:1 e óxidos de Fe e Al. O caráter eletropositivo do Latossolo Vermelho pode ser verificado pelo valor de ΔpH , ou seja, a diferença do pH em KCl e pH em água. Nota-se que o ΔpH para o Latossolo Vermelho é maior que zero, indicando o estado predominantemente gibbsítico/oxídico dos mesmos.

O Neossolo Quartzarênico foi coletado próximo a uma área cultivada, onde eram realizadas fertirrigações. Isso pode ter contribuído para que este solo apresentasse teor de potássio mais elevado.

Na Figura 1 estão mostradas as curvas de retenção e na Tabela 2 os parâmetros do modelo de Brooks e Corey para os solos em estudo.

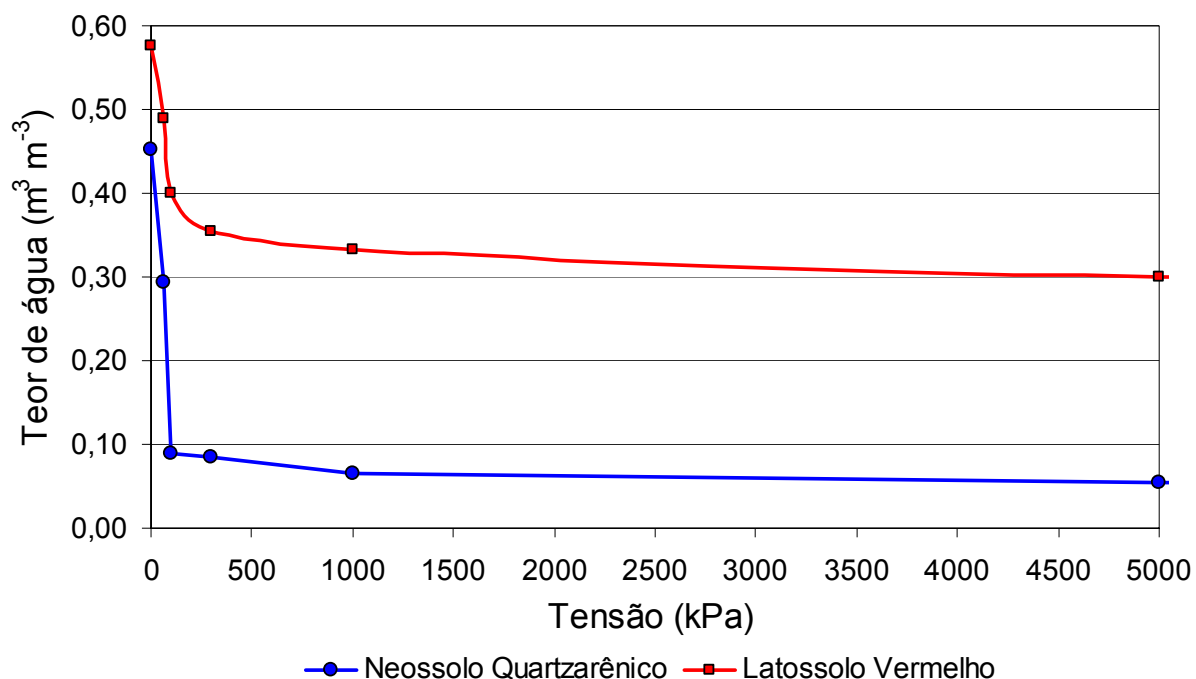


Figura 1. Curva característica de retenção de água para os solos em estudos.

Tabela 2. Parâmetros do modelo de Brooks e Corey, ajustado pelo RETC para os solos em estudo

Parâmetros de Brooks e Corey	Neossolo Quartzarênico	Latossolo Vermelho
Lambda - λ	3,4343	0,2075
Potencial de entrada de ar (cm)	51,84	11,53

3.3. Calibração de sondas de TDR

Na determinação dos teores de água e condutividade elétrica no solo, pela TDR, há necessidade de uso de sondas instaladas no solo e conectadas diretamente à TDR, além da calibração para determinação do teor de água para cada solo e para condutividade elétrica.

As sondas de TDR usadas no experimento foram confeccionadas em laboratório, sendo compostas de três hastes de 0,13 m de comprimento, dos quais 0,10 m de comprimento efetivo e 0,03 m de comprimento coberto por resina. As hastes foram espaçadas, entre si, de 1,7 cm e não dispunham de resistor na haste central (SILVA, 2005).

A calibração das sondas para determinação do teor de água foi feita usando-se a metodologia proposta por Cecilio et al. (2004), sendo determinadas as constantes dielétricas (K_a) com a utilização da TDR e os teores de água de colunas de solo por gravimetria, desde a saturação até valores próximos ao de retenção de água a -1500 kPa. Estes valores foram correlacionados, gerando-se uma regressão que permitiu estimar os teores de água nos solos em função de valores de constante dielétrica obtidas com utilização da TDR.

A determinação da condutividade elétrica do solo (CE_s), com a utilização da TDR, depende do conhecimento da constante geométrica da sonda (K_p). A obtenção dessa constante foi possível mediante medições da condutividade elétrica de soluções, com diferentes concentrações, usando condutivímetro de bancada e, simultaneamente, fez-se medidas de condutividade elétrica destas soluções usando a TDR com as sondas. Essas medições eram feitas usando K_p igual a 1 na equação de Giese & Tieman (1975), Equação 1, usada pela TDR 100 (Campbell Scientific).

Apesar desta equação ser empregada para condutividade elétrica do solo, ela também foi adotada para obtenção do K_p , com a utilização de solução.

$$CE_s = \frac{K_p}{Z_u} \times \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (12)$$

em que,

CE_s = condutividade elétrica do solo ou da solução de calibração ($dS\ m^{-1}$);

K_p = constante geométrica da sonda; e

Z_u = impedância no cabo ($\sim 50\ \Omega$).

O coeficiente de reflexão foi determinado por:

$$\rho = \left(\frac{V_1}{V_0} \right) - 1 \quad (13)$$

em que,

V_1 = amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR

V_0 = amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão do início da sonda

Os valores de CE_s determinados com TDR, usando-se K_p igual a 1, corresponderam a $\frac{1}{Z_u} \times \frac{1-\rho}{1+\rho}$ da Equação 12. A partir destes valores e da CE_s

medida com condutímetro, foi obtido, por regressão linear simples, com intercepto igual a zero, o valor de K_p , igual a 56,41.

3.4. Calibração de modelos matemáticos que relacionam CE_{ss} , CE_s e teor de água

Na calibração desses modelos, referentes às equações 1, 2, 6, 7, 8 e 11, foram usadas colunas de solos com 0,15 m de altura e 0,098 m de diâmetro, nas quais foram estabelecidos diferentes valores de condutividades elétricas e de teores de água disponíveis no solo. Os valores de condutividades elétricas do solo foram obtidos a partir da aplicação de solução de nitrato de cálcio e fosfato monoamônico (MAP), em diferentes concentrações. Os teores de água no solo foram obtidos com a

aplicação de diferentes volumes dessas soluções. Na Tabela A1 do Apêndice estão apresentados os valores obtidos de condutividades elétricas no solo, teor de água e a condutividade elétrica na solução dos solos, após aplicação das referidas soluções.

Foram realizados, para essa calibração, quatro experimentos. Sendo estes com aplicação de diferentes concentrações de MAP no Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho e, diferentes concentrações de nitrato de cálcio no Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho.

Procurou-se trabalhar numa amplitude de valores de CE_s e θ que possibilitasse a calibração para aplicação em condições práticas, variando a condutividade elétrica da solução aplicada de 0 (zero) a 12 dS m^{-1} e o teor de água variando de valores próximos a saturação até teor de água mínimo no solo que possibilitasse retirada de solução pelo extrator.

Para a aplicação de MAP no Neossolo Quartzarênico foram necessárias realizar duas calibrações. Uma calibração para concentração de fósforo na solução do solo inferior a 60 mg L^{-1} e outra para valores superiores, alcançado uma concentração máxima na solução do solo de aproximadamente 3500 mg L^{-1} . O intervalo de 0 a 60 mg L^{-1} foi definido como baixa concentração e superior a 60 mg L^{-1} , como alta concentração. Inicialmente foi gerado um modelo único para toda faixa de concentração, porém, ao aplicar este modelo em condições práticas, o modelo, subestimava a ponto de fornecer valores negativos de concentração de P. O limite de 60 mg L^{-1} , possibilitou obter boa precisão para os dois casos (alta e baixa concentração).

Vinte e quatro horas após a aplicação da solução em cada coluna foi inserida, verticalmente, uma sonda, a qual foi acoplada a um multiplexador ligado a uma TDR 100 (Campbell Scientific), para realização das leituras de CE_s e θ . No momento das leituras com a TDR, foi feita a medição da temperatura do solo por meio de sensor Termopar conectado ao Datalogger CR10X. Imediatamente após cada leitura, a sonda era retirada e no mesmo local foi inserido um extrator de solução. Ao extrator era aplicado uma sucção de aproximadamente 80 kPa e esperado um tempo suficiente para a extração da solução, a qual era armazenada em frascos devidamente limpos. A quantidade de solução extraída variava de aproximadamente

8 mL para o menor teor de água no solo a 25 mL quando o solo estava próximo à saturação. Nestas soluções extraídas eram feitas as determinações da condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) e dos teores de fósforo e de nitrato. A condutividade elétrica da solução do solo foi medida com uso de condutivímetro de bancada e os teores de fósforo e nitrato determinados por espectrofotômetro pelo método colorimétrico (YANG et al., 1998) no Laboratório de Qualidade de Água o Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Os dados de CE_s e de teores de água, obtidos utilizando-se a TDR, e os dados de CE_{ss} medidos foram usados para ajustar, pelo Método dos Mínimos Quadrados, os parâmetros referentes às equações 3, 4, 8, 9, 10 e 11. Os modelos potencial e linear, relacionando CE_{ss} e a concentração do nutriente (C_i) para cada solo e nutriente aplicado, também foram ajustados.

A avaliação dos modelos usados para estimar CE_{ss} , a partir de dados de θ e de CE_s obtidos com a TDR, e de CE_{ss} , a partir de C_i , foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2). Em caso de R^2 igual, foi adotado o modelo no qual apresentava regressor mais próximo de 1, da equação com intercepto igual a zero, que relaciona CE_{ss} medido e CE_{ss} estimado (Figuras A1, A2, A3, A4 e A5).

Dentre os modelos representados pelas equações 1, 2, 6, 7, 8 e 11, o que proporcionou melhor estimativa da CE_{ss} a partir de CE_s e θ foi usado para cálculo da concentração de fósforo e nitrato, mediante a conjugação deste com aquele que melhor relacionou CE_{ss} e C_i . Dessa forma, foi gerado um modelo único que permitiu estimar a concentração iônica por meio de valores de CE_s e θ , para cada solo e fertilizante aplicados.

3.5. Determinação dos parâmetros de transporte do fósforo e nitrato no solo

As curvas de efluentes do fósforo (P) e do nitrato (NO_3^-) foram determinadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, usando como fluidos deslocadores soluções de fosfato monoamônico e nitrato de

cálcio, respectivamente, para ambos os solos, de acordo com o método apresentado em Ramos (1998).

As colunas utilizadas foram construídas de segmentos de tubo de PVC, com 4,80 cm de diâmetro interno e 20 cm de comprimento, cujas extremidades inferiores foram aderidas a malhas e colocados discos de lã de vidro para facilitar a drenagem e evitar perda de material do solo. A altura de solo no interior da coluna foi de 15 cm.

Durante o enchimento da coluna, para distribuição mais homogênea, um bastão de vidro era movimentado constantemente. Este movimento prosseguia até atingir o volume e a massa específica desejada. Na superfície do solo foram colocados discos de lã de vidro, a fim de evitar que o fluido deslocador, ao ser aplicado na coluna, não ocasionasse perturbação na superfície do solo.

As colunas de solo foram saturadas de forma ascendente com água destilada. Terminada a saturação, foi posicionado o sistema de carga constante do tipo frasco de Mariotte nas extremidades superiores das colunas; aplicou-se, então, às mesmas soluções de MAP e nitrato de cálcio, mantendo-se uma lâmina constante de 2,5 cm acima da superfície do solo.

Os números de amostras coletadas foram de 16 com exceção para a aplicação de solução de MAP no Latossolo Vermelho, onde, foram coletadas 25 amostras. Os números de volumes de poros também foram variados. Para obter concentração relativa mais próxima da unidade foram necessários sete volumes de poros para solução de MAP no Neossolo Quartzarênico, três volumes de poros para solução de nitrato de cálcio no Neossolo Quartzarênico, vinte e três volumes de poros para solução de MAP no Latossolo Vermelho e três volumes de poros para solução de nitrato de cálcio no Latossolo Vermelho.

As concentrações das soluções aplicadas foram de 277,80 mg L⁻¹ de P para o Neossolo Quartzarênico, 22,50 mg L⁻¹ de NO₃⁻ para o Neossolo Quartzarênico, 1055,10 de P para o Latossolo Vermelho e de 21,80 mg L⁻¹ de NO₃⁻ para o Latossolo Vermelho.

O fluxo foi determinado pela relação volume total coletado por tempo total vezes a área da coluna.

Os coeficientes dispersivo-difusivo, número de Peclet, o coeficiente de partição, a dispersividade e os fatores de retardamento para o fósforo e nitrato foram obtidos usando as curvas de efluentes no aplicativo DISP (BORGES JÚNIOR & FERREIRA, 2006), tendo como as variáveis de entrada do programa, os dados de fluxo, porosidade total, altura de solo na coluna, número de volume de poros e concentração relativa experimental.

3.6. Experimento de fertirrigação

Recipientes feitos de tubos de PVC de 0,15 m de diâmetro e 0,70 m de comprimento, fechado em uma das extremidades e com um dreno na base, foram preenchidos com uma camada de material de solo de 0,66 m, sobrando uma borda de 0,04 m. O solo foi compactado nos recipientes, de modo a se obter massas específicas semelhantes às encontradas no campo. Sondas de TDR foram inseridas horizontalmente nas colunas de solo, espaçadas verticalmente de 9 cm entre si (Figura 2a), para possibilitar a quantificação do teor de água e da condutividade elétrica do solo. A primeira sonda foi inserida numa profundidade de 3 cm.

Dezoito colunas foram preenchidas com o Neossolo Quartzarênico e dezoito com Latossolo Vermelho, sendo que para cada solo, nove colunas foram fertirrigadas com fósforo, usando fosfato monoamônico, e nove com nitrato de cálcio. Em cada combinação de solo e nutriente, a fertirrigação foi aplicada no início, no meio e no final do período de irrigação. Foi construído um sistema (Figura 2b e 2c) que possibilitou a irrigação e a aplicação de fertilizante na dosagem desejada. O sistema, construído com frascos de Mariotte conectados a um recipiente gotejador, possibilitou manter uma carga hidráulica constante e aplicar a água e a solução fertilizante numa vazão média de $0,73 \text{ L h}^{-1}$.

Após a montagem, as colunas foram submetidas a uma irrigação inicial, visando-se elevar o teor de água, na camada de 0 a 0,30 m de profundidade, a valores superiores aos de teores de água na capacidade de campo. Terminada esta irrigação, esperou-se um período para ocorrer a redistribuição da água nas colunas de solo (Figura 2a), o qual alcançou a profundidade aproximada de 0,48 cm para o Neossolo Quartzarênico e, a profundidade inferior a esta para o Latossolo Vermelho.

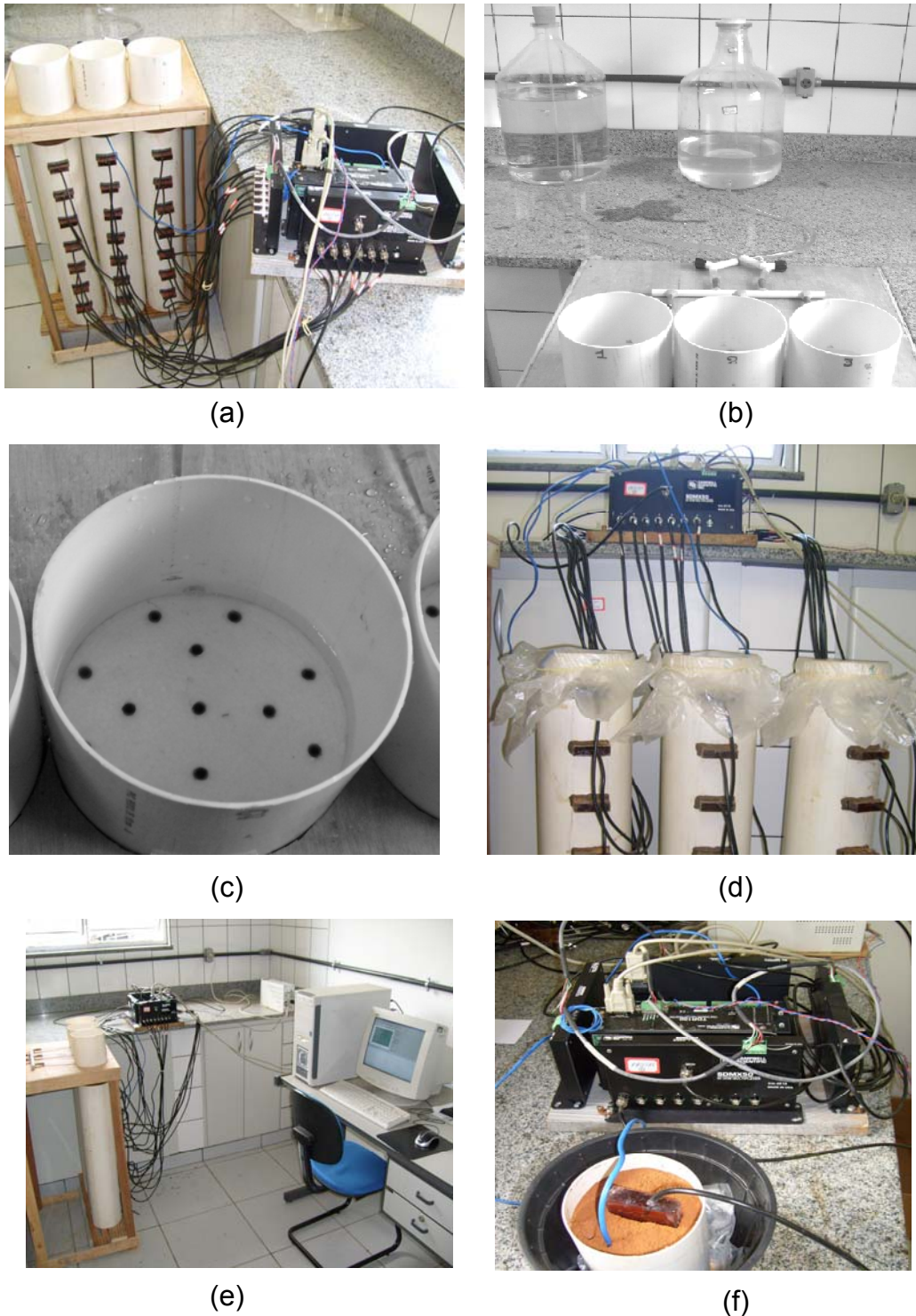


Figura 2. Sistema usado na irrigação e fertirrigação: a) Colunas de solos sendo fertirrigadas, b) Sistema gotejador, c) detalhe do recipiente gotejador, d) cobertura plástica na superfície da coluna, e) acompanhamento da distribuição de água e condutividade elétrica utilizados e f) Conjunto: TDR, datalogger e multiplexers, na medição de θ , CE_s e temperatura.

Cessada a redistribuição, foi feita uma segunda irrigação, correspondente a aplicação dos tratamentos, na qual foi aplicada uma lâmina de 0,38 L de água e 0,10 L de solução fertilizante em cada coluna, sendo a solução fertilizante aplicada no início, no meio ou no final da irrigação. As doses aplicadas dos fertilizantes foram de 57,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 33,3 kg ha⁻¹ de N, sendo baseados em valores máximos recomendados de 690 kg ha⁻¹ ano⁻¹ e de 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de P₂O₅ e N, respectivamente, para a cultura da bananeira (Borges et al., 2006), distribuídos numa frequência mensal de aplicação. A irrigação foi feita com água destilada e a solução fertilizante (fertilizante dissolvido em água destilada) apresentava condutividade elétrica de 3,66 dS m⁻¹ para solução com nitrato de cálcio e de 1,82 dS m⁻¹ para a solução com MAP. Após a irrigação, as colunas eram cobertas com plástico para evitar evaporação e permitir somente a redistribuição (Figura 2d).

Durante o período de irrigação, fertirrigação e de redistribuição, o teor de água e a condutividade elétrica do solo foram determinadas usando um aparelho de TDR conectado a um datalogger (Figura 1a, 1d e 1e). O datalogger foi programado para emitir comandos para se fazer leitura com a TDR em intervalos de 3 minutos durante a irrigação ou fertirrigação e em intervalo de 10 minutos após o final da irrigação, quando ocorria a redistribuição da água e dos fertilizantes no solo. Cada teste era encerrado quando, na coluna, a variação do teor de água com o tempo era mínima. As leituras de condutividade elétrica do solo e de teor de água foram convertidas em concentração de fósforo e nitrato, as quais, juntamente com os teores de água e de condutividade elétrica do solo, foram utilizados para traçar os perfis de distribuição de água, de condutividade elétrica do solo, de fósforo e de nitrato em diferentes tempos durante e após a irrigação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelos matemáticos para determinar o teor de água condutividade elétrica da solução do solo e a concentração do fósforo e do nitrato

Na Figura 3 encontra-se o modelo polinomial de terceira ordem e o linear que proporcionaram as melhores estimativas dos teores de água no Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico com base na constante dielétrica medida utilizando-se o TDR.

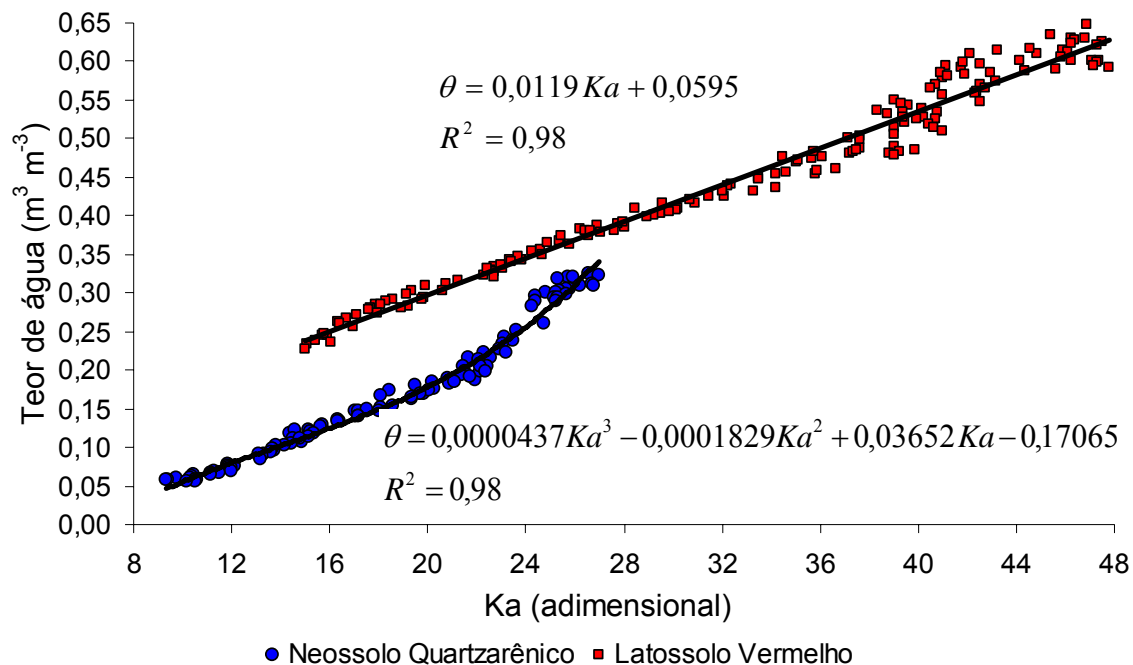


Figura 3. Modelos para estimativa do teor de água (θ) a partir da medição da constante dielétrica do solo (Ka).

4.1.1. Modelos para estimativa de condutividade elétrica da solução do solo

Nos solos em estudo, o modelo que melhor estimou a CE_{ss} foi o de Vogeler et al., (1996) seguido pelos modelos de Rhoades (1976) e Heimovaara et al. (1995) equação 11, 1 e 8, para o fósforo e para o nitrato (Tabela 3, 4, 5 e 6). É importante frisar que, apesar do modelo de Vogeler et al., (1996) ter sido proposto para solos

com elevada agregação, este se ajustou bem aos dados, para o Neossolo Quartzarênico.

Santana (2006), avaliando estes mesmos modelos de estimativa de CE_{ss} em função de CE_s e θ em solos fertirrigados com KCl, verificou que o modelo de Vogeler et al. (1996) foi o que proporcionou a obtenção de melhor estimativa de CE_{ss} para o solo de classe textural franco arenosa, resultados que estão coerentes com os obtidos neste trabalho.

Santos et al. (2005a, 2005b) trabalhando com Latossolo Amarelo de textura franco-argilo-arenosa, fertirrigado com MAP e nitrato de cálcio, obtiveram melhores estimativa de CE_{ss} com o modelo de Vogeler et al., (1996), seguido do modelo de Rhoades (1976), para ambos os fertilizantes. Os resultados deste trabalho, também apresentam concordância com aqueles obtidos por SANTANA et al. (2004) e COELHO et al. (2004), que obtiveram melhores estimativas de CE_{ss} utilizando com os modelos de Rhoades (1976) e de Vogeler et al. (1996).

Tabela 3. Modelos para estimativa de CE_{ss} em Neossolo Quartzarênico fertirrigado com fosfato monoamônico

Nutriente	Modelo	R ²
Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0345}{-2,176\theta^2 + 1,5878\theta}$	0,80
Nadler (1984)	Não ajustou aos dados	-
Rhoades et al. (1989)	Não ajustou aos dados	-
Fósforo Baixa Ci	Mualen et al. (1991) $CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0345}{\left(\frac{\theta^{1,1666}}{\theta_s}\right)}$	0,71
Heimovaara et al. (1995)	$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{0,213}})^{0,213}\right]}{(\theta - 0,05)^{1,70268+1} \left[1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{0,90058}})^{0,90058}\right]^2}$	0,80
Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,434417\theta + 0,021373)}{(0,475695\theta + 0,030135)}$	0,97

	Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0121}{-1,34349\theta^2 + 1,0474\theta}$	0,90
	Nadler (1984)	$CE_{ss} = F_T (CE_s - \delta CE_{fs}) F_\theta$	0,57
	Rhoades et al. (1989)	Não ajustou aos dados	-
Fósforo alta Ci	Mualen et al. (1991)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0125}{\left(\frac{\theta^{1,4019}}{\theta_s}\right)}$	0,37
	Heimovaara et al. (1995)	$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{0,7166}} \right)^{0,7166} \right]}{(\theta - 0,05)^{0,840423+1} \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{8,45447}} \right)^{8,45447} \right]^2}$	0,89
	Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,358553\theta + 0,020258)}{(0,350974\theta + 0,047314)}$	0,93

Tabela 4. Modelos para estimativa de CE_{ss} em Neossolo Quartzarênico fertirrigado com nitrato de cálcio

	Modelo	R^2
Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0121}{-0,24977\theta^2 + 0,7381\theta}$	0,93
Nadler (1984)	$CE_{ss} = F_T (CE_s - \delta CE_{fs}) F_\theta$	0,73
Rhoades et al. (1989)	Não ajustou aos dados	-
Mualen et al. (1991)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0125}{\left(\frac{\theta^{1,486}}{\theta_s}\right)}$	0,53
Heimovaara et al. (1995)	$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{1,1723}} \right)^{1,1723} \right]}{(\theta - 0,05)^{0,379558+1} \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{9,20784}} \right)^{9,20784} \right]^2}$	0,89
Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,2367\theta + 0,0322)}{(0,5650\theta + 0,0084)}$	0,96

Tabela 5. Modelos para estimativa de CE_{ss} para Latossolo Vermelho fertirrigado com MAP

	Modelo	R^2
Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,04}{-8,57951\theta^2 + 6,6523\theta}$	0,82
Nadler (1984)	Não ajustou aos dados	-
Rhoades et al. (1989)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - \left[\frac{(\phi_s + 0,0707\theta - 0,5113)^2}{\phi_s} \right]}{[\theta - (0,0707\theta - 0,5113)]}$	0,76
Mualen et al. (1991)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,04}{\left(\frac{\theta^{0,492}}{\theta_s} \right)}$	0,63
Heimovaara et al. (1995)	Não ajustou aos dados	-
Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,114154\theta + 0,045607)}{(-1,9088\theta + 1,71408)}$	0,92

Tabela 6. Modelos para estimativa de CE_{ss} para Latossolo Vermelho fertirrigado com nitrato de cálcio

	Modelo	R^2
Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,04}{-0,04209\theta^2 + 0,387346\theta}$	0,97
Nadler (1984)	$CE_{ss} = F_T (CE_s - \delta CE_{fs}) F_\theta$	0,42
Rhoades et al. (1989)	Não ajustou aos dados	-
Mualen et al. (1991)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,04}{\left(\frac{\theta^{2,573}}{\theta_s} \right)}$	0,71
Heimovaara et al. (1995)	$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{0,6954}})^{0,6954} \right]}{(\theta - 0,17)^{1,045115+1} \left[1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{8,15309}})^{8,15309} \right]^2}$	0,94
Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,1156\theta + 0,0045)}{(0,3405\theta + 0,0042)}$	0,97

4.1.2. Modelos para estimativa da concentração do fósforo e nitrato com valores de CE_s e θ

Os modelos lineares e potenciais que relacionam a condutividade elétrica da solução do solo à concentração do nutriente estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7. Modelos que relacionam a condutividade elétrica de equilíbrio na solução do solo (CE_{ss}) à concentração do nutriente (C_i) na solução nele aplicada

Solo	Nutriente		Modelo	R^2
Neossolo Quartzarênico	Fósforo baixa C_i	Linear	$CE_{ss} = 0,003344C_i + 0,565341$	0,68
		Potencial	$CE_{ss} = 0,410731C_i^{0,200779}$	0,96
	Fósforo alta C_i	Linear	$CE_{ss} = 0,002406C_i + 1,206525$	0,97
		Potencial	$CE_{ss} = 0,146344C_i^{0,47429}$	0,74
	Nitrato	Linear	$CE_{ss} = 0,05757C_i - 0,14464$	0,91
		Potencial	$CE_{ss} = 0,040682C_i^{1,06714}$	0,92
Latossolo Vermelho	Fósforo	Linear	$CE_{ss} = 0,00661C_i + 0,059104$	0,89
		Potencial	$CE_{ss} = 0,041895C_i^{0,584303}$	0,97
	Nitrato	Linear	$CE_{ss} = 9,008850C_i + 0,014334$	0,98
		Potencial	$CE_{ss} = 2,982696C_i^{0,642014}$	0,67

CE_{ss} em $dS\ m^{-1}$ e C_i em $mg\ L^{-1}$

No Neossolo Quartzarênico, o modelo que melhor relacionou a CE_{ss} à concentração do fósforo na solução do solo, foi o potencial (Tabela 7), quando esta era baixa, e o linear, quando a concentração era alta. No caso do nitrato, a diferença do linear para o potencial é mínima, no entanto, foi considerado o modelo linear para estimar CE_{ss} a partir de C_i , para toda faixa de concentração estudada.

No Latossolo Vermelho, o modelo potencial (Tabela 7) foi o que possibilitou que se obtivesse melhor estimativa da CE_{ss} a partir da concentração do fósforo, enquanto que para o nitrato o melhor modelo foi o linear.

Os modelos que proporcionaram que se obtivessem melhores estimativas das concentrações de fósforo e nitrato no Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho estão apresentados na Tabela 8.

A combinação do modelo de Vogeler et al. (1996) (Tabela 3) com os modelos potencial e linear (Tabela 7) resultaram nos modelos (Tabela 8) para a estimativa do

fósforo no Neossolo Quartzarênico. Para esse mesmo solo, o modelo para estimativa da concentração de nitrato foi obtido combinando-se o modelo linear (Tabela 7) com o de Vogeler et al. (1996) (Tabela 4).

No caso do Latossolo Vermelho, o modelo para estimativa da concentração do fósforo (Tabela 8) foi obtido combinando o modelo potencial (Tabela 7) com o de Vogeler et al. (1996) (Tabela 5). Já para o nitrato, o modelo apresentado na Tabela 8 foi resultante da combinação do modelo linear (Tabela 7) com o modelo de Vogeler et al. (1996) (Tabela 6).

Santana et al. (2004), trabalhando com concentração de potássio na solução do solo, verificaram que o modelo que melhor relacionou a condutividade elétrica da solução com a concentração de potássio foi o potencial para solo de classe textural franca, enquanto, para solo de classe textural franca arenosa, o modelo linear explicou bem esta relação. Este resultado é semelhante ao encontrado neste trabalho.

Tabela 8. Modelos para estimativa da concentração do fósforo e do nitrato (mg L^{-1}) nos solos em estudo

Solo	Nutriente	Modelo
Neossolo Quartzarênico	Fósforo em baixa Ci	$Ci_p = \left[\left(\frac{CE_s - (0,434417 \times \theta + 0,021373)}{(0,475695 \times \theta + 0,030135)} \right) / 0,410731 \right]^{0,200779}$
	Fósforo em alta Ci	$Ci_p = \left[\left(\frac{CE_s - (0,358553 \times \theta + 0,020258)}{(0,350974 \times \theta + 0,047314)} \right) - 1,2065248 \right] / 0,0024057$
	Nitrato	$Ci_{NO_3^-} = \left[\left(\frac{CE_s - (0,236741 \times \theta + 0,032169)}{(0,564989 \times \theta + 0,008389)} \right) + 0,14464 \right] / 0,05757$
Latossolo Vermelho	Fósforo	$Ci_p = \left[\left(\frac{CE_s - (0,114154 \times \theta + 0,045607)}{(-1,9088 \times \theta + 1,71408)} \right) / 0,041895 \right]^{0,584303}$
	Nitrato	$Ci_{NO_3^-} = \left[\left(\frac{CE_s - (0,11557 \times \theta + 0,00452)}{(0,34053 \times \theta + 0,00421)} \right) - 0,014334 \right] / 9,00885$

Analisando a Figura 3, verifica-se que, os modelos proporcionaram superestima da concentração de fósforo medida em 14,84 %, quando aplicadas soluções em que estava contido em baixa concentração, e subestimaram a

concentração do fósforo medida em 0,73% quando aplicadas soluções em que estava contido em alta concentração. No caso do nitrato, o modelo proporcionou subestimativa da concentração medida em 1,30 %. E na Figura 4, nota-se que, em média, os modelos (Tabela 8) proporcionaram subestimativas das concentrações de fósforo medidas em 2,89 %, e superestimativas da concentração de nitrato em 1,92, % para o Latossolo Vermelho. Estes resultados mostram que é possível, através da TDR, estimar a concentração iônica no solo com uma boa precisão.

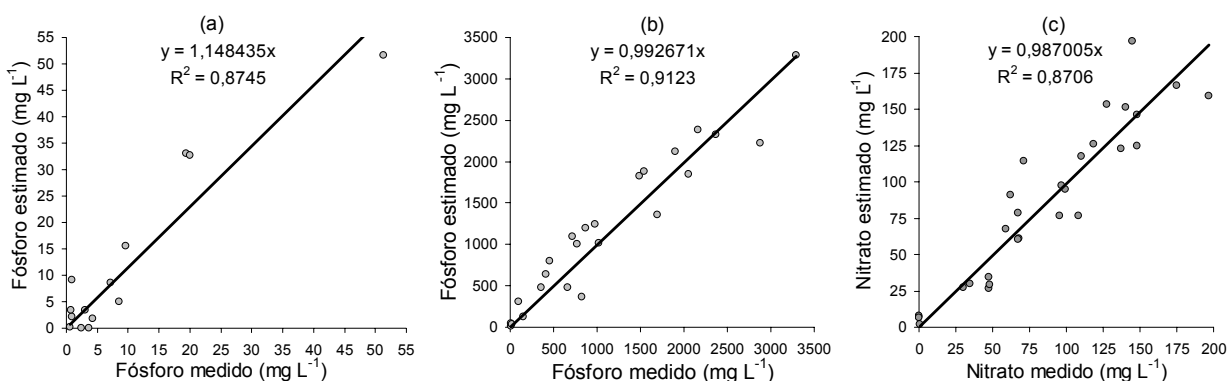


Figura 3. Relação entre as concentrações estimadas e medidas de fósforo na solução do solo, para baixas (a) e altas concentrações (b) e de nitrato na solução do solo (c) no Neossolo Quartzarênico.

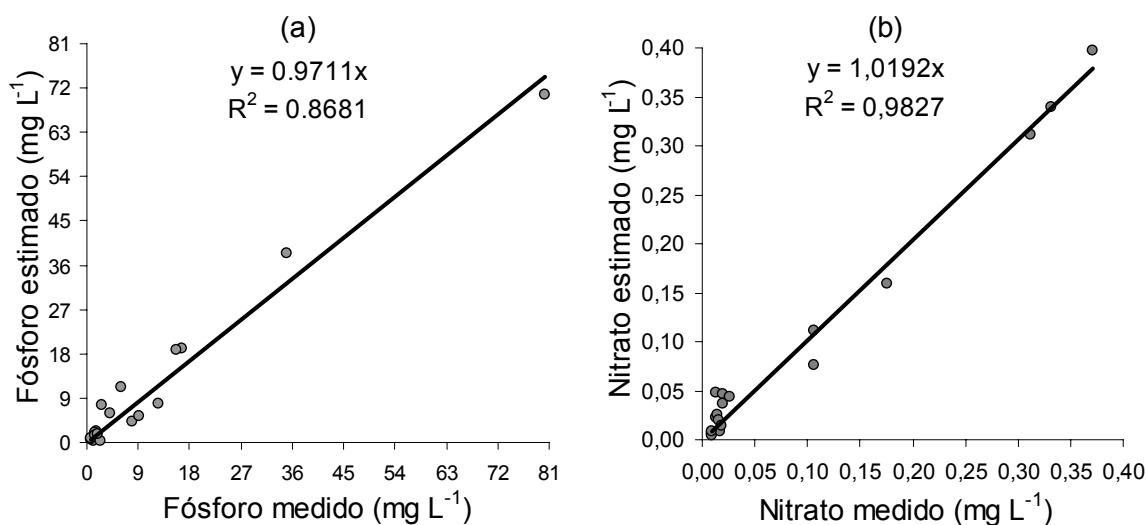


Figura 4. Relação entre as concentrações estimadas e medidas de fósforo na solução do solo (a) e nitrato na solução do solo (b) no Latossolo Vermelho.

4.2. Parâmetros de transporte do fósforo e nitrato

Estão apresentados, na Tabela 9, os parâmetros de transporte do fósforo e do nitrato para os solos em estudo.

Observa-se, na Tabela 9 que o fator de retardamento do fósforo nos dois solos é maior que o fator de retardamento do nitrato, refletindo que os dois solos são mais reativos para o fósforo em comparação ao nitrato, o que também explica a baixa mobilidade do fósforo em relação ao nitrato no solo. Verifica-se, ainda, que no Latossolo Vermelho o fator de retardamento é maior do que no Neossolo Quartzarênico, tanto para o fósforo quanto para o nitrato. Isso evidencia que a textura do solo influencia na retenção dos íons, sendo que a textura mais fina e com característica de eletropositividade provoca maior retardo no deslocamento do nitrato. As características dos solos influenciam significativamente os valores do fator retardamento, Oliveira et al, (2004).

Tabela 9. Parâmetros de transporte de nitrato e fósforo nos solos em estudo

Parâmetros	Solo			
	Neossolo Quartzarênico		Latossolo Vermelho	
	Fósforo	Nitrato	Fósforo	Nitrato
Fluxo (cm.h ⁻¹)	73,222	78,622	22,700	28,042
Nº de Peclet - P	4,590	6,950	2,300	2,560
Fator de retardamento - R	2,522	0,882	9,503	2,029
Coefficiente de Partição – K _d (cm ³ g ⁻¹)	0,4605	0	4,563	0,5522
Coefficiente Dispersivo-difusivo – D (cm ² h ⁻¹)	528,93	375,083	257,11	285,357
Dispersividade (cm)	3,268	2,158	6,522	5,859

Solos muito intemperizados (oxídicos), com elevado teor de argila, exercerão predominantemente a função de drenos, enquanto aqueles poucos intemperizados (ricos em minerais primários silicatados) exercerão o papel de fontes de fósforo (NOVAIS & SMYTH, 1999). A retenção do nitrato está relacionada às propriedades físicas e químicas destes solos, tais como pH, matéria orgânica, superfície de adsorção e concentração eletrolítica (BLACK & WARING, 1979 apud OLIVEIRA et al., 2000).

O fator de retardamento do fósforo no Latossolo Vermelho foi de 9,50, o que define esse solo como de alta capacidade de retenção ou baixa mobilidade de fósforo. O contrário foi observado para o nitrato no Neossolo Quartzarênico, onde, o fator de retardamento foi de 0,88. Quando o meio poroso é não-reativo para o íon, geralmente o fator de retardamento é igual a 1 ou próximo da unidade. Nesse caso, o fator de retardamento foi inferior a uma unidade, o que provavelmente ocorreu em virtude do nitrato natural do solo, onde, este poderia emanar nas primeiras amostras coletadas, antes mesmo do que o nitrato contido no fluido deslocador. Comportamento como esse pode ser explicado também, por motivo de exclusão aniônica, ou por baixa mobilidade de soluto em poros de pequeno diâmetro. É observado na Tabela 1, que o pH em água para o Neossolo Quartzarênico é maior que o pH em KCl, indicando predomínio de cargas negativas, o que poderia concorrer para ocorrer-se uma exclusão aniônica.

Os coeficientes de dispersão-difusão são maiores, para ambos os nutrientes, no Neossolo Quartzarênico. Isso aconteceu, provavelmente, devido ao maior fluxo nas colunas preenchidas com este solo, o qual proporcionou maior dispersão mecânica do soluto no meio. No entanto, a dispersividade foi maior no Latossolo, refletindo a maior heterogeneidade dos poros presente nesse solo.

Observa-se, ainda, na Tabela 9 que o coeficiente de partição para o nitrato no Neossolo Quartzarênico apresenta valor zero, explicando, a baixa capacidade que o solo apresenta de adsorção do nitrato na fase sólida. O contrário é observado para o fósforo no Latossolo Vermelho. Nota-se que o coeficiente de partição é de 4,56, indicando a alta capacidade que tem este solo de manter maior concentração do P está na fase sólida do solo.

4.3. Distribuição de água, fósforo, nitrato e condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico

Estão mostradas na Figura 5, a distribuição de água e a condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico, desde a primeira irrigação em que aplicou somente água, até o final do tratamento com nitrato de cálcio aplicado no início da segunda

irrigação. Observa-se que, no início da primeira irrigação, o teor de água estimado usando a TDR era inferior ao teor de água do ponto de murcha permanente.

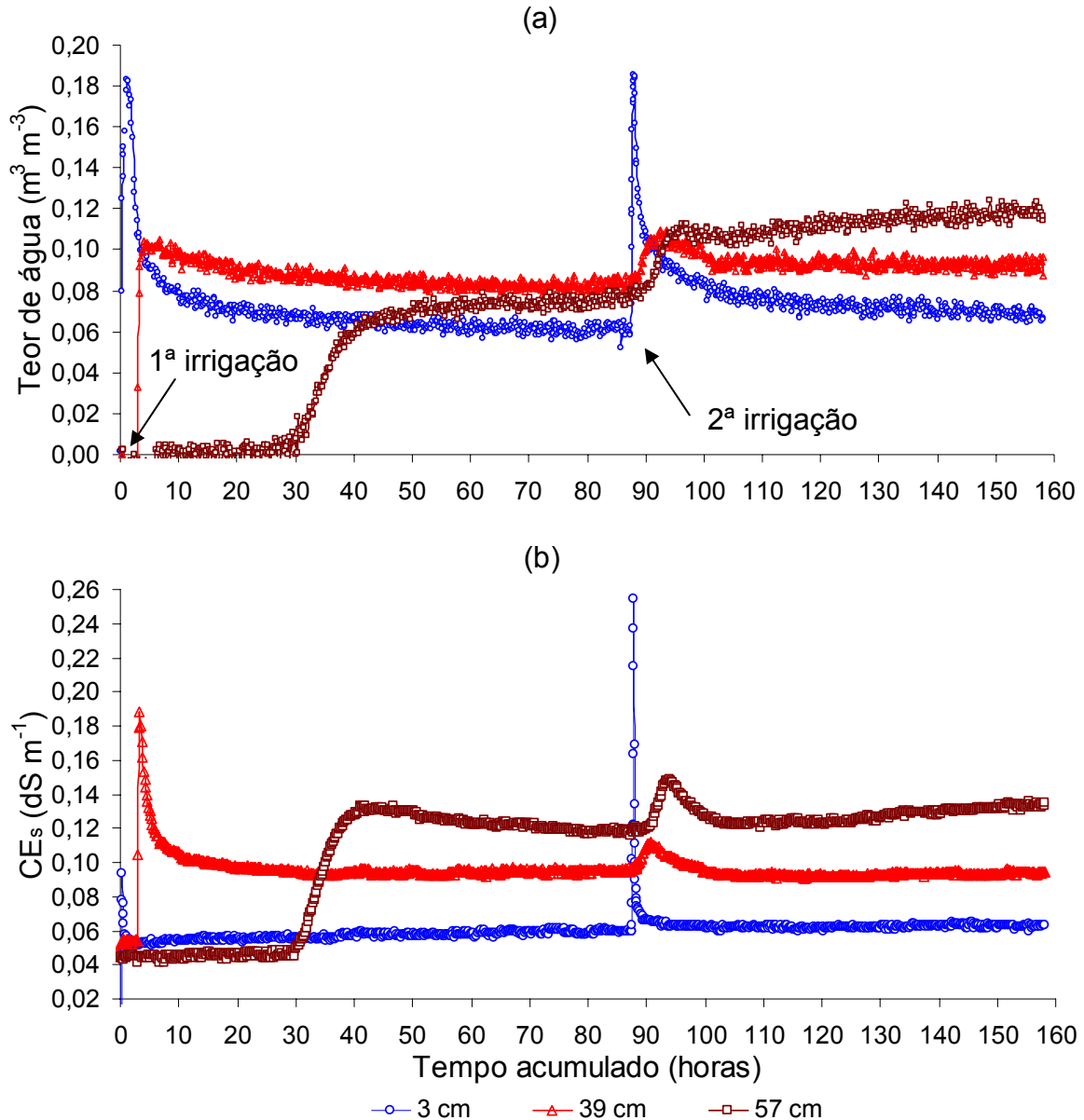


Figura 5. Teor de água e condutividade elétrica em diferentes profundidades na coluna de Neossolo Quartzarênico, fertirrigada com o nitrato de cálcio, no início da segunda irrigação.

A primeira irrigação, que durou aproximadamente 1,5 horas, elevou o teor de água a valores acima da capacidade de campo. Cessada a irrigação, a coluna de

solo passou por um período de redistribuição, ao final do qual toda coluna ficou com teor de água acima do ponto de murcha permanente. Nota-se, pelo aumento nos valores da condutividade elétrica do solo nas maiores profundidades, que a primeira irrigação provocou a lixiviação dos sais já existentes no solo.

Na Figura 6 está mostrada a distribuição de água e a condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico, a partir da segunda irrigação, para fertirrigações feitas com MAP no início, meio e final desta irrigação. Observa-se a influência do momento da aplicação da solução fertilizante na condutividade elétrica do solo. Nota-se que a condutividade elétrica atinge valor máximo de 0.052 dS m^{-1} na camada superficial (3 cm), quando aplicou-se fertirrigação no final da irrigação, e de $0,22 \text{ dS m}^{-1}$ na mesma camada, quando aplicou a solução fertilizante no início da irrigação. Sendo que o teor de água nos dois casos não apresenta grandes diferenças em valores absolutos nas profundidades de 3 e 12 cm, o que explica que o soluto não avançou além dos 3 cm de profundidade quando a aplicação do fertilizante foi realizada ao final da irrigação.

Nota-se, também na Figura 6, valores de CE_s elevados nas camadas mais profundas, referente a 39, 48 e 57 cm, o que não ocorreu por influencia da aplicação do MAP. Antes de iniciar o experimento propriamente dito, as colunas eram submetidas a uma irrigação para que o teor de água ficasse na faixa entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Nessa irrigação foi observado que os sais contidos no solo eram conduzidos para as camadas mais profundas, juntamente com a frente de umedecimento, o que pode ser verificado pelo aumento expressivo no valor da condutividade elétrica do solo, conforme pode ser visto na Figura 5.

Com base nos dados apresentados na Tabela 1, nota-se que o solo apresenta 46 mg L^{-1} de potássio, $2,1 \text{ mg L}^{-1}$ de P e pequena quantidade de outros sais, isso pode ter contribuído para que durante a primeira irrigação realizada nas colunas, houvesse arraste dos sais contidos no solo para aquelas camadas mais profundas.

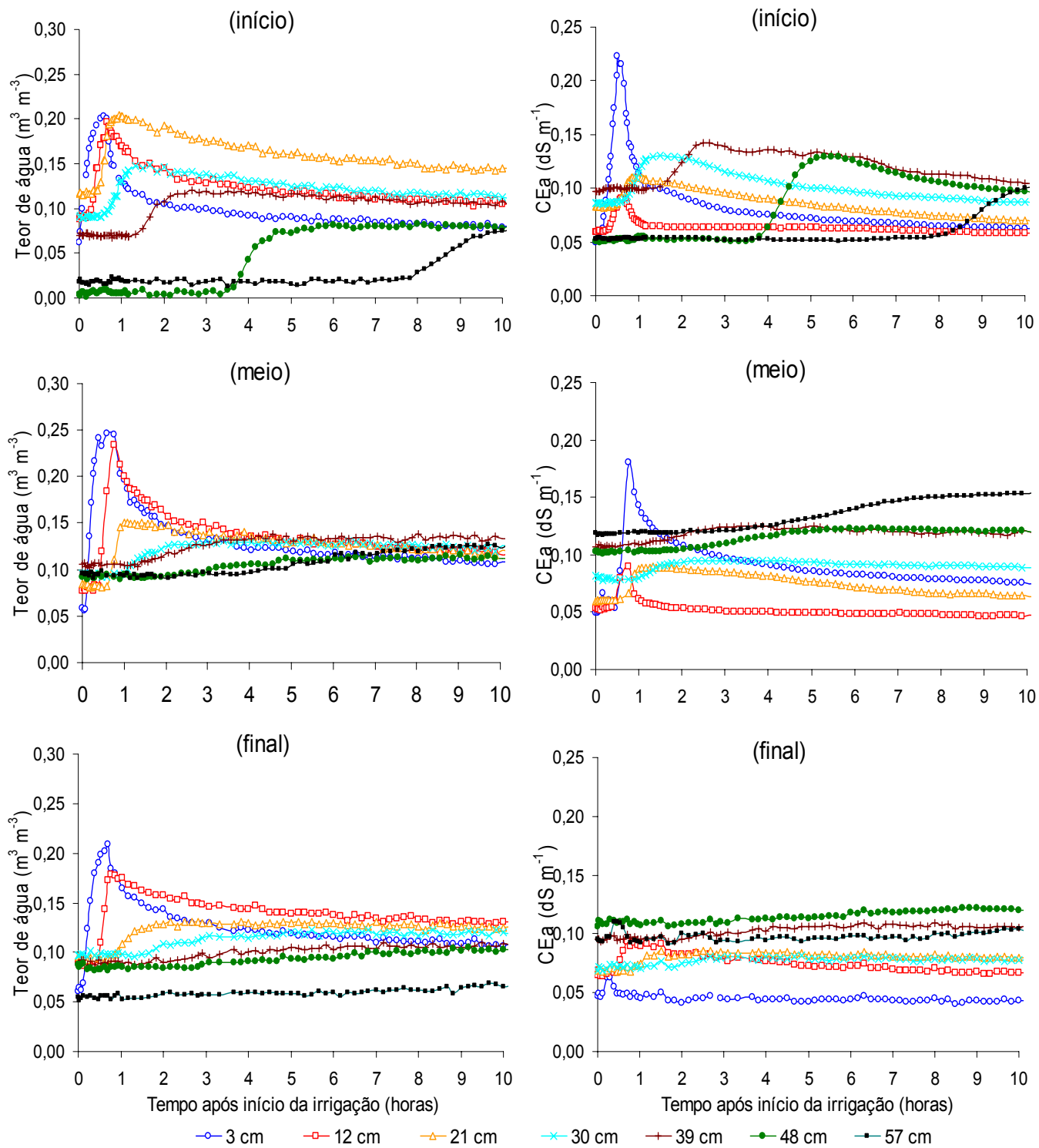


Figura 6. Teor de água e condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico com aplicação de MAP no início, meio e final da irrigação.

Observa-se, na Figura 7, a influência do momento da aplicação da fertirrigação na distribuição de fósforo no Neossolo Quartzarênico. Verifica-se que, quando a fertirrigação foi realizada no início ou no meio da irrigação, o fósforo avançou além dos 3 cm de profundidade, porém não alcançando os 12 cm, ou seja, o fósforo ficou adsorvido na camada de 3 a 12 centímetros de profundidade. Isso é notado devido ao pico no gráfico referente à sonda 3 cm, o qual não aparece nos 12 cm (Figura 7a e 7b).

Tendo em vista que o fósforo não deslocou além dos 3 cm de profundidade, não é apresentada a distribuição de fósforo, quando a fertirrigação foi realizada no final da irrigação.

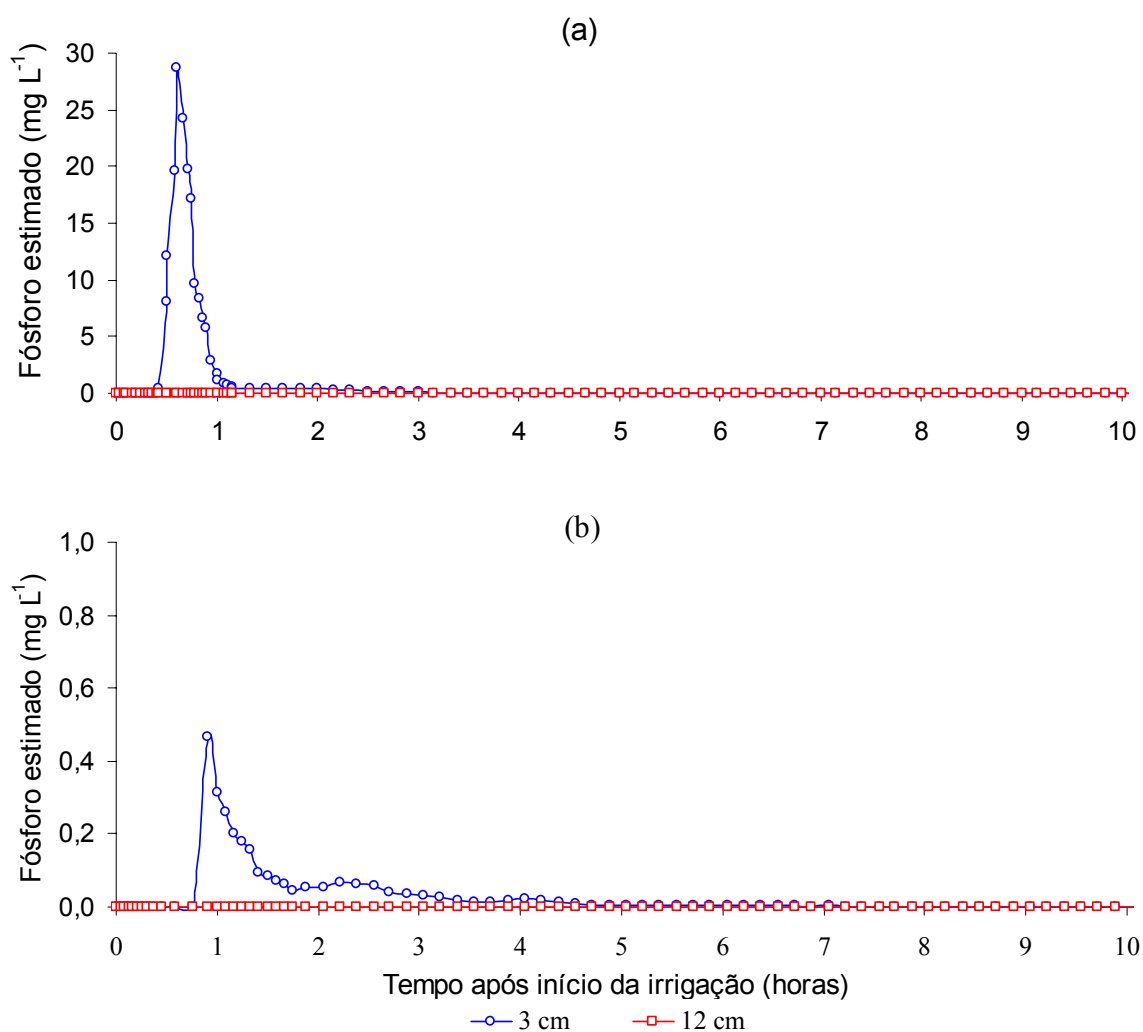


Figura 7. Teor de fósforo na solução no Neossolo Quartzarênico quando a fertirrigação foi realizada no início da irrigação (a) e meio da irrigação (b).

Na Figura 8 está mostrada a distribuição de água e a condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico, a partir da segunda irrigação, para fertirrigações feitas com nitrato de cálcio no início, meio e final desta irrigação.

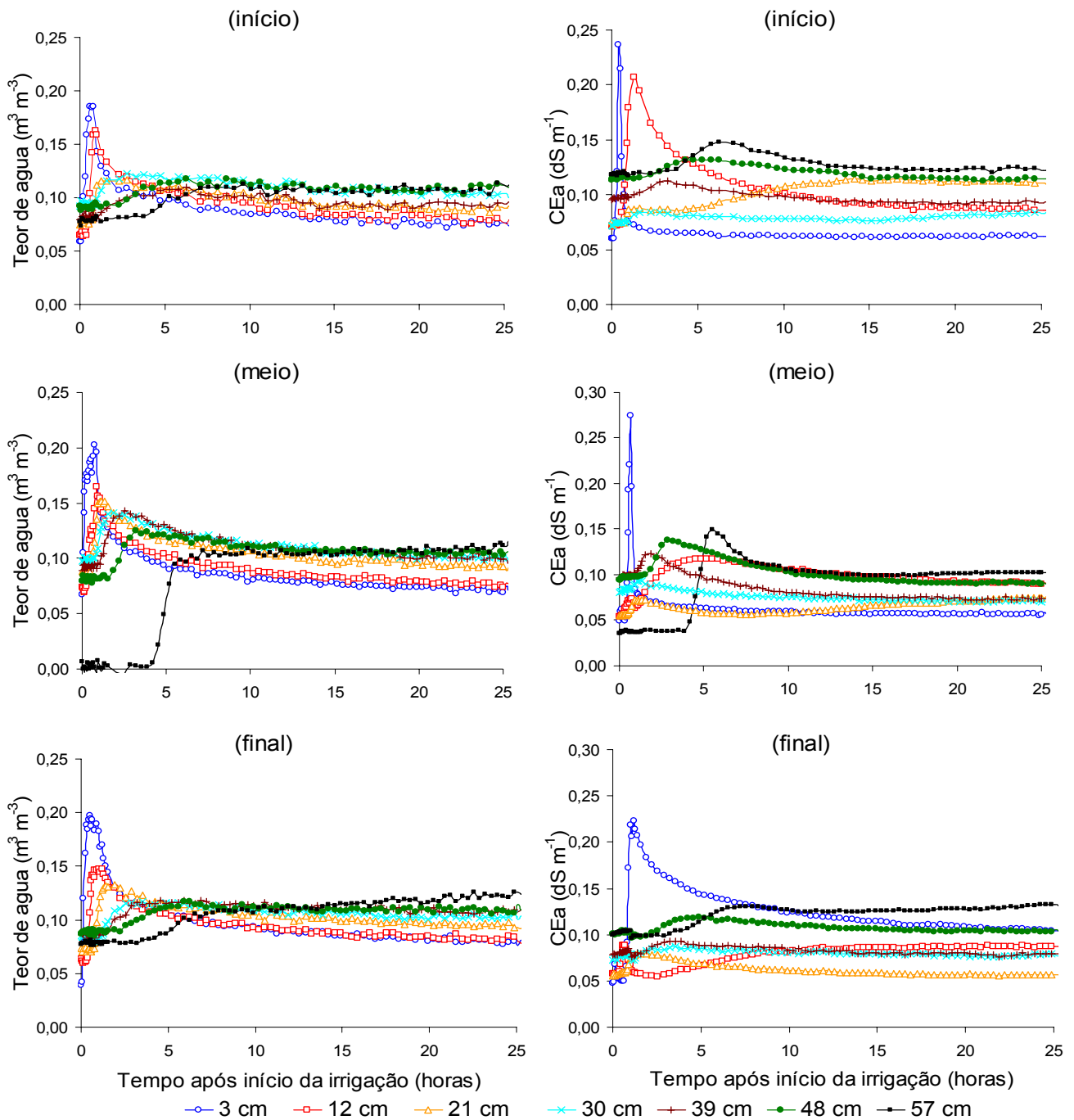


Figura 8. Teor de água e condutividade elétrica no Neossolo Quartzarênico com aplicação de nitrato de cálcio no início, meio e final da irrigação.

Observando a influência do momento da aplicação da solução fertilizante na condutividade elétrica do solo na Figura 8, nota-se que a condutividade elétrica começa a aumentar a partir das 15 horas na profundidade de 30 cm, a partir de 7,5 horas na profundidade de 21 cm e a partir de 2 horas após o início da irrigação, para fertirrigação no início, meio e final da irrigação, respectivamente. Indicando que o soluto alcançou estas profundidades nos referidos tempos.

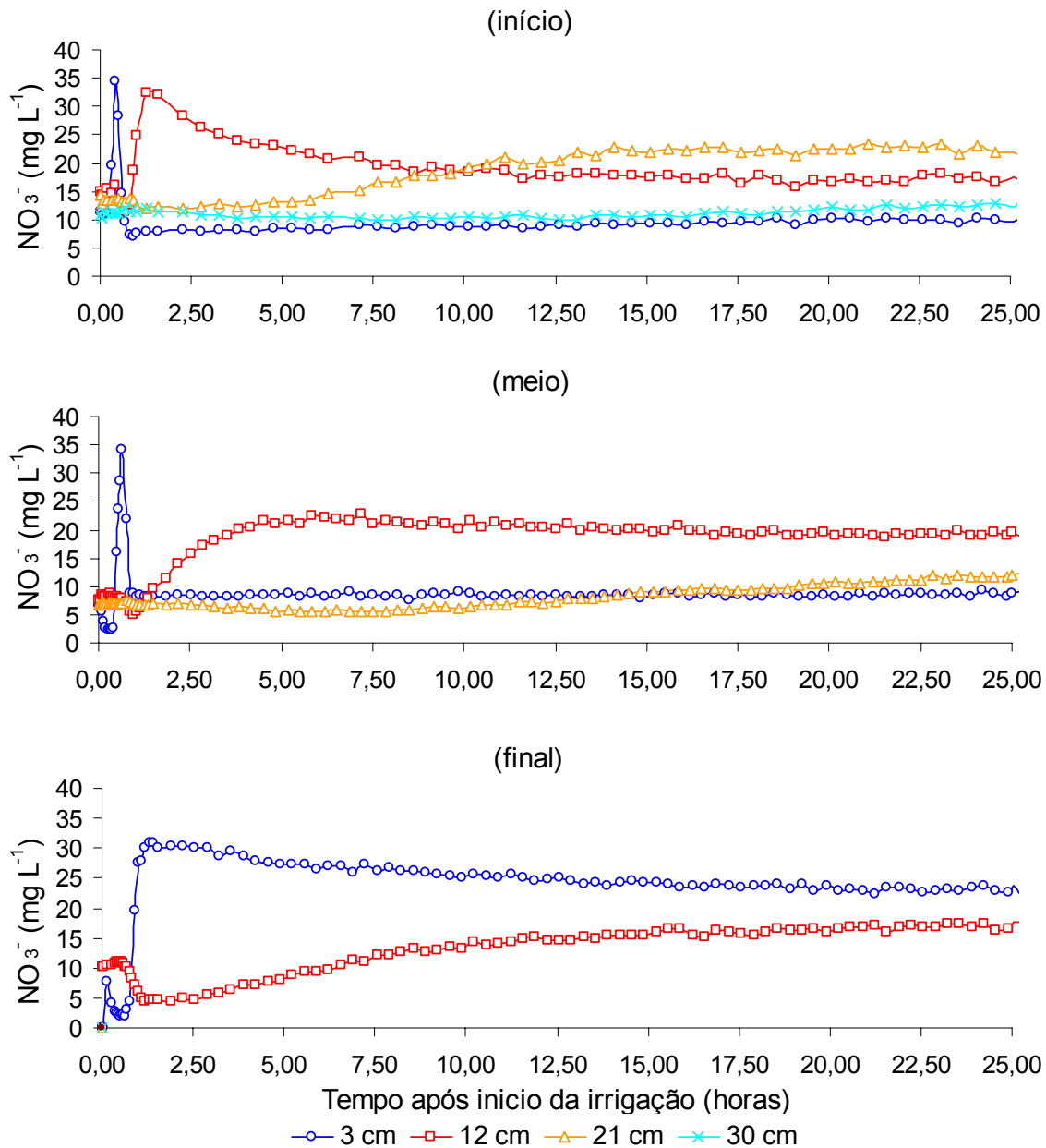


Figura 9. Teor de nitrato no Neossolo quartzarênico com fertirrigação realizada no início, meio e final da irrigação.

Na Figura 9 foi mostrada a distribuição do nitrato no Neossolo Quartzarênico, nos diferentes momentos de aplicação do nitrato de cálcio durante a irrigação. Verifica-se que o nitrato alcança os 30, 21 e 12 cm de profundidade quando a aplicação fertilizante foi realizada no início, meio e final da irrigação, respectivamente.

Nota-se, também na Figura 9, que já no início da aplicação da solução fertilizante, a concentração do nitrato em cada profundidade apresentava valor maior do que zero, fato ocasionado, provavelmente, pelo arrastamento de sais das camadas superficiais para as mais profundas, durante a primeira irrigação.

Analisando a distribuição do nitrato e do fósforo no Neossolo Quartzarênico, verifica-se que há maior mobilidade do nitrato do que de fósforo, o que já era esperado por motivo de interações desses íons com o meio poroso, como demonstrado pelos parâmetros de transporte (Tabela 10).

Com esses resultados é possível prever uma perda por lixiviação além da região correspondente à zona de absorção radicular após sucessivas irrigações, quando aplicado o nitrato de cálcio em Neossolos Quartzarênico, em condições práticas de campo. Vale ressaltar que o presente estudo foi tido como base uma aplicação de nitrato de cálcio numa dose de $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N. Numa frequência de aplicação mensal, é de se esperar que a aplicação poderá proporcionar apresentar adsorção em menores profundidades, uma vez que haverá redução na quantidade aplicada e na concentração, havendo menor saturação de sítios de adsorção de NO_3^- no solo. Vale ainda ressaltar que aqui não houve sumidouro por parte de sistemas radicular de culturas.

Souza et al. (2007) trabalhando com dinâmica de nitrato em Latossolo Vermelho-Amarelo sob 7 fertirrigações consecutivas, monitoradas com uso da TDR, verificaram que, para uma aplicação de KNO_3 , numa concentração de $14,5 \text{ mmol L}^{-1}$, que o sal alcançou uma profundidade de aproximadamente 0,22 m e o maior armazenamento ocorreu na camada de 0-0,10 m durante todas as aplicações da solução no solo. Em média, 53% da solução aplicada foi armazenada nesta camada, e 28% na camada de 0,10-0,20 m. O movimento da solução para a terceira camada

(0,20-0,30 m) foi observado apenas após a 2ª aplicação, atingindo a última camada (0,30-0,40 m) após a 4ª irrigação.

Os resultados obtidos nesse trabalho apresentam maior avanço do nitrato no solo, se comparados com aqueles obtidos por Souza et al. (2007), considerando apenas uma irrigação. Torna-se importante ressaltar que na pesquisa desenvolvida por Souza et al. (2007) foi usada baixa concentração na solução aplicada e, provavelmente, o Latossolo Vermelho-Amarelo contribuiu com maiores sítios de adsorção do nitrato.

4. 4. Distribuição de água, fósforo, nitrato e condutividade elétrica no Latossolo Vermelho

Na Figura 10, observa-se o comportamento da distribuição do teor de água e condutividade elétrica do solo desde a primeira irrigação para preparação da coluna a receber o tratamento com fertirrigação de nitrato de cálcio no início da irrigação para o Latossolo Vermelho. Verifica-se que, ao longo de todo o período, a CE_s só foi alterada depois de um certo tempo, quando aplicou-se a solução fertilizante. Diferente do Neossolo Quartzarênico, no qual os sais contidos no solo, na primeira irrigação, foram arrastados com a frente de umedecimento, o qual pode ser verificado pela alteração no valor de sua CE_s .

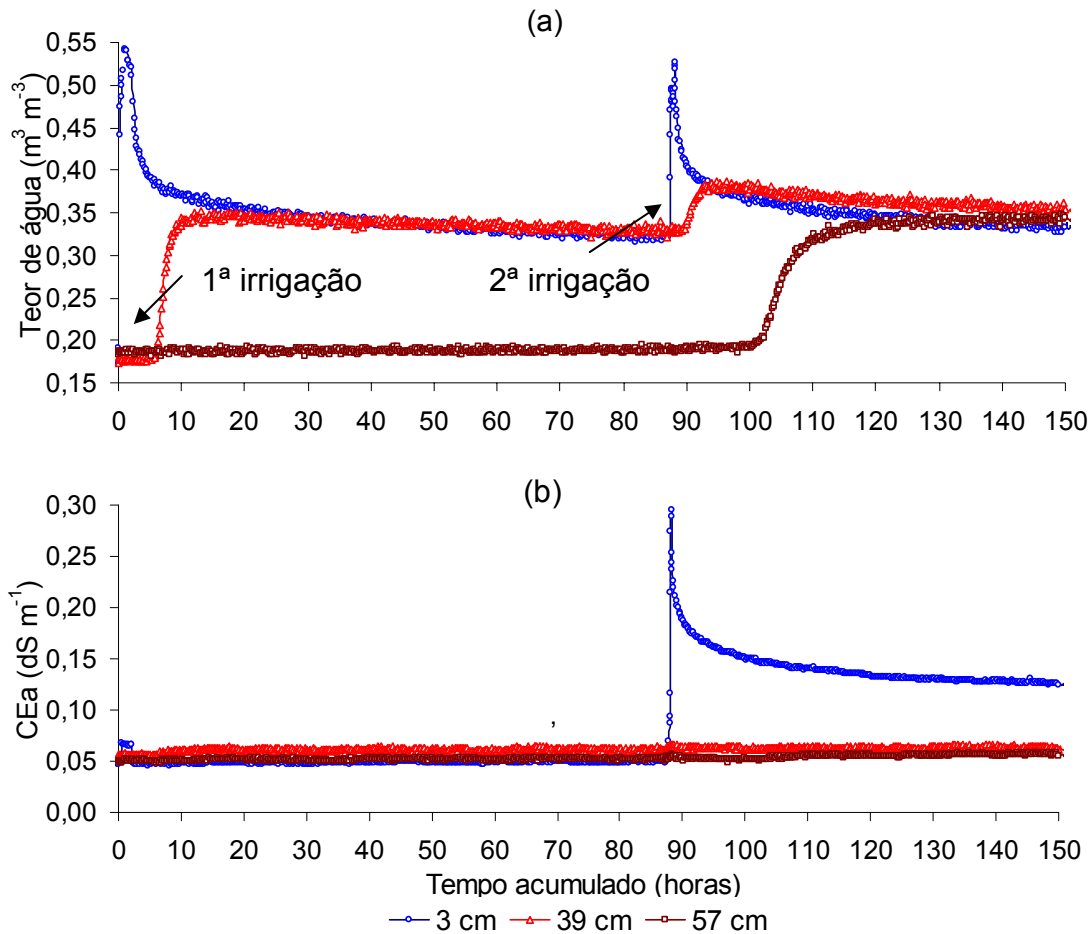


Figura 10. Distribuição do teor de água e condutividade elétrica em diferentes profundidades no Latossolo Vermelho, a partir do início da primeira irrigação ao final do teste com o nitrato de cálcio aplicado na segunda irrigação.

Na Figura 11, observa-se a influência da fertirrigação com MAP no início da irrigação do Latossolo Vermelho na distribuição do teor de água e da condutividade elétrica. Nota-se que CE_s permanece relativamente inalterada ao longo do período analisado enquanto há redistribuição da água na coluna, evidenciando que o fósforo contido na solução fertilizante ficou adsorvido às partículas de argila na camada superficial do solo, permitindo apenas a dinâmica e redistribuição da água no solo.

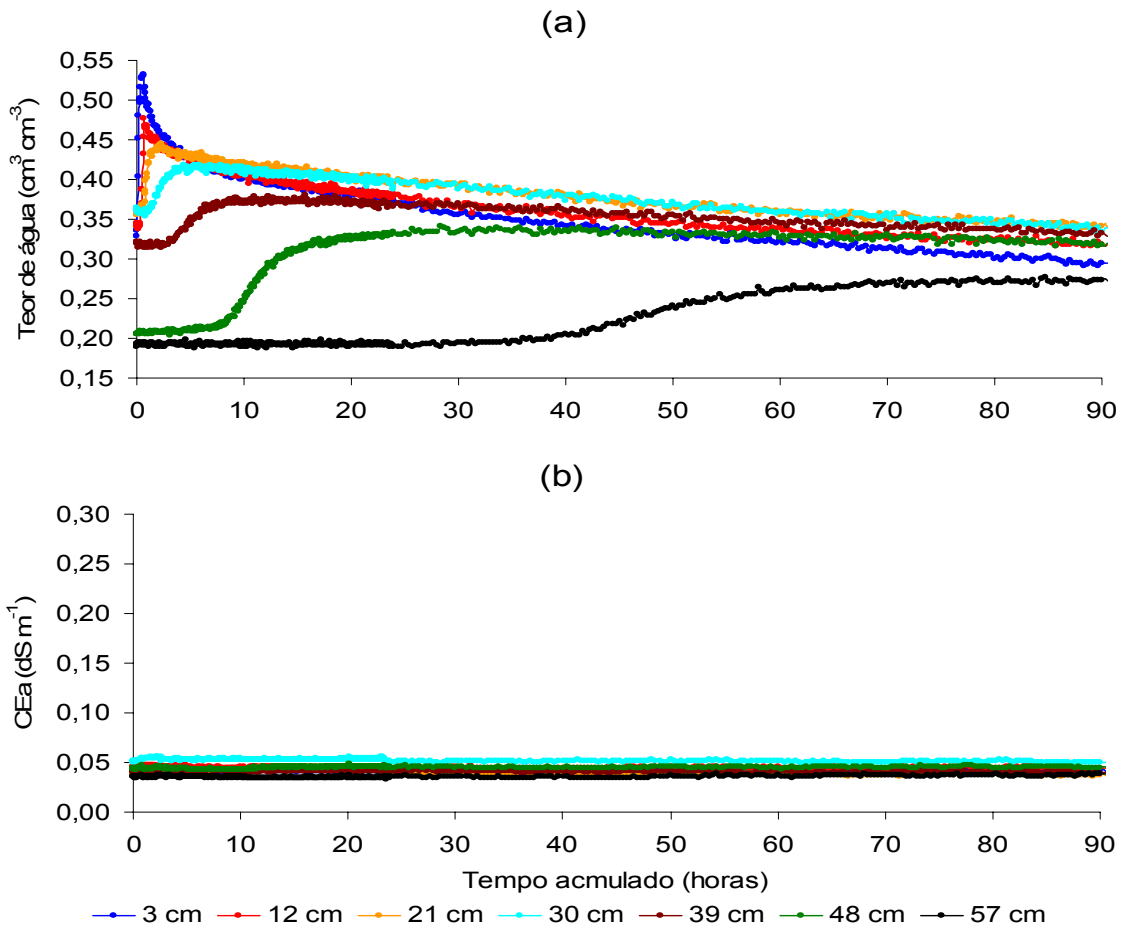


Figura 11. Teor de água (a) e condutividade elétrica (CE_s) (b) do Latossolo após a fertirrigação com MAP, no início da segunda irrigação.

No Latossolo Vermelho, a fertirrigação realizada no início da irrigação (Figura 11) não proporcionou lixiviação do P disponível além dos 3 cm de profundidade do solo, sendo que a frente umedecimento alcançou pelo menos os 57 cm. Para verificar se havia necessidade de realizar fertirrigação no meio e final da irrigação, foi realizada uma nova fertirrigação com solução de MAP, seis vezes mais concentrada que a primeira. Foi verificado nessa segunda fertirrigação que o sal também não alcançou os 3 cm de profundidade. Como neste caso o fósforo não avançou para as camadas mais profundas, não houve necessidade da aplicação da fertirrigação tanto no meio quanto no final da irrigação.

A baixa mobilidade do fósforo no Latossolo Vermelho se deve provavelmente, ao alto teor de argila (Tabela 1) e a eletropositividade que apresenta. Rolim Neto

(2002) ressalta que, com o aumento do intemperismo, principalmente em condições tropicais, os solos tornam-se mais eletropositivos e com grande capacidade de adsorver ânions, tais como os fosfatos e os nitratos.

Estudando a distribuição do fósforo disponível em solo fertirrigado com ácido fosfórico, numa dose de 10 kg ha^{-1} de P_2O_5 em cada aplicação, após 5 aplicações sucessivas, Foratto et al. (2007) verificaram que em Latossolo Vermelho eutrófico, de textura muito argilosa, o fósforo atingiu uma profundidade de aproximadamente 30 cm e o bulbo molhado alcançou 80 cm, sendo que todas as aplicações foram feitas com a mistura fertilizante. Ressalva aqui, que mesmo aplicando uma dose de $57,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 , quantidade semelhante à aplicada por Foratto et al. (2007), o solo neste estudo apresenta característica de eletropositividade, o que o diferencia do solo usado por Foratto et al. (2007), além disso, no referido estudo foram realizadas cinco aplicações consecutivas.

A influência do momento da fertirrigação com solução de nitrato de cálcio na distribuição da água e condutividade elétrica do solo está apresentada na Figura 12. Observa-se, com base nos valores CE_s , o retardo no avanço do sal em relação ao avanço da frente de umedecimento.

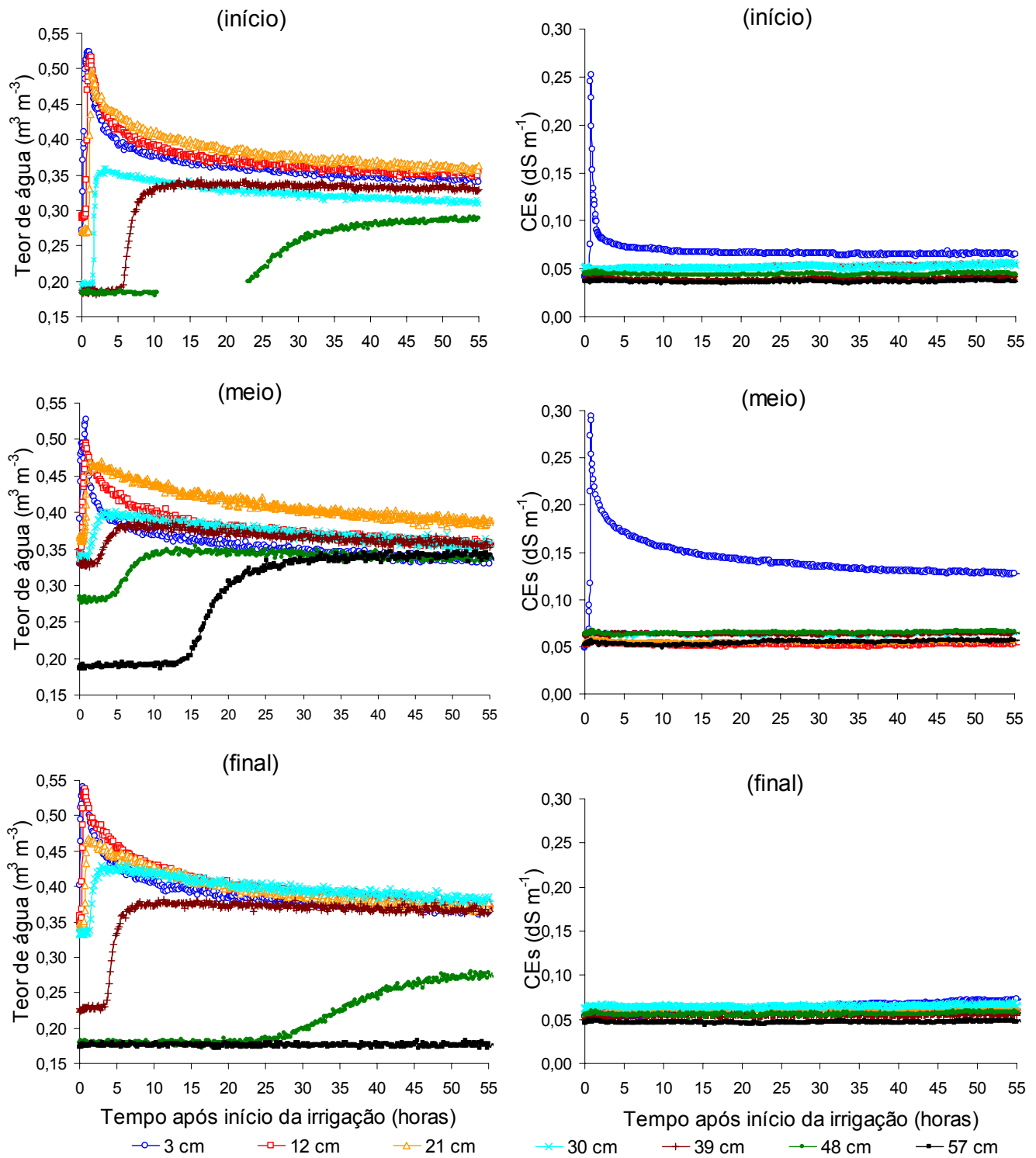


Figura 12. Teor de água e condutividade elétrica do Latossolo Vermelho com aplicação de nitrato de cálcio.

Para a aplicação do nitrato no Latossolo Vermelho, verificou-se que esse ânion avançou além dos 3 cm de profundidade, alcançando os 12 cm quando a aplicação do nitrato de cálcio foi realizada no início da irrigação (Figura 13). Quando a aplicação ocorreu no meio da irrigação, a concentração do nitrato aumentou nas proximidades dos 3 cm.

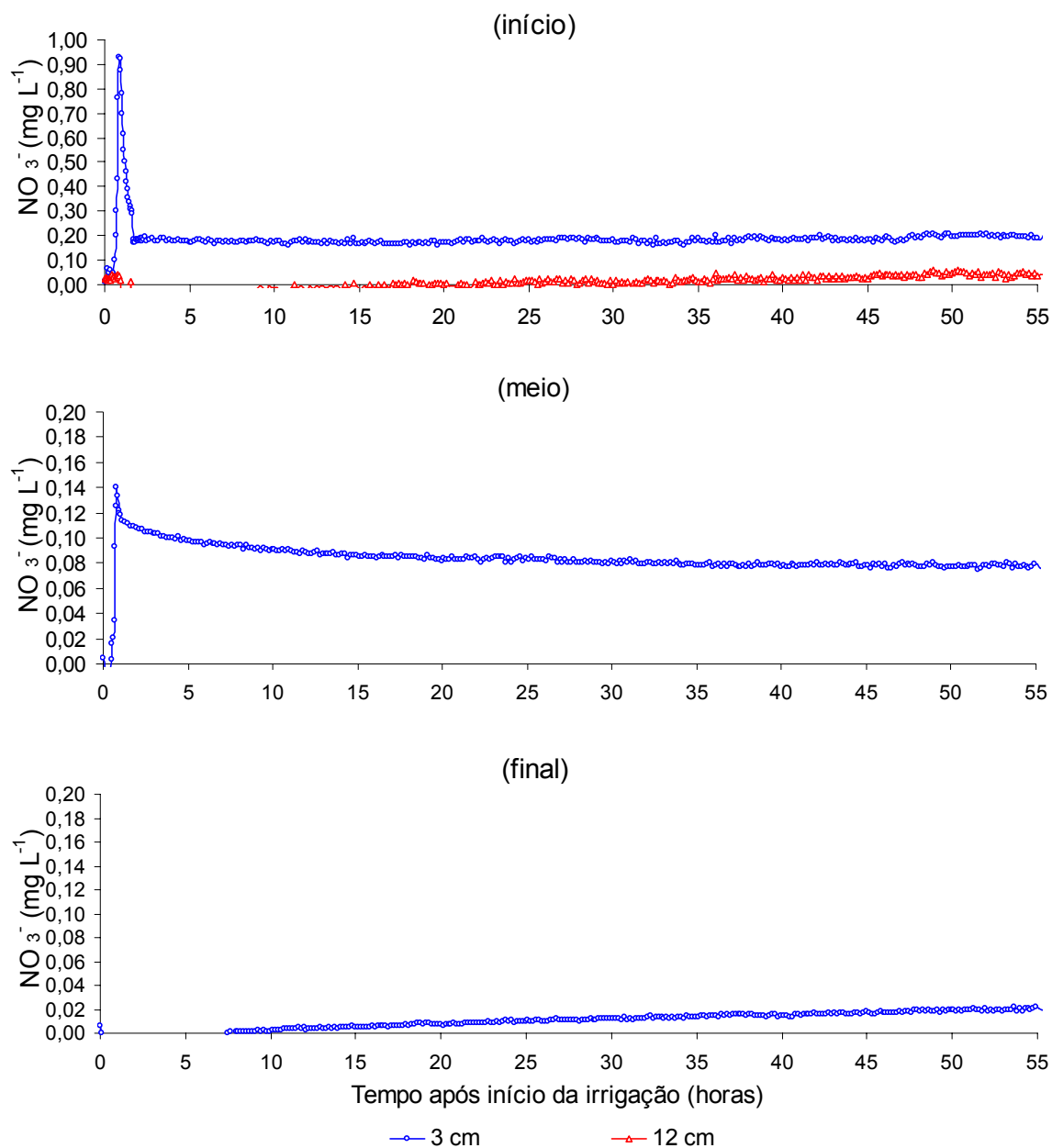


Figura 13. Teor de nitrato no Latossolo com fertirrigação realizada no início, meio e final da irrigação.

Quando a fertirrigação foi realizada no final da irrigação, o nitrato ficou adsorvido na camada superficial, atingindo a profundidade de 3 cm oito horas após o início da irrigação.

Analisando as Figuras 9 e 13, verifica-se a influência das características físicas e químicas dos solos estudados na mobilidade do nitrato. No Latossolo Vermelho, que apresenta característica de eletropositividade, a mobilidade foi bem menor que no Neossolo Quartzarênico. Oliveira et al. (2000), estudando a adsorção de nitrato em Latossolo de cerrado, verificaram que a maior adsorção de nitrato ocorre na subsuperfície do solo, em razão da inversão de cargas entre o íon e as argilas.

Neste trabalho, a baixa mobilidade do nitrato no Latossolo Vermelho pode ser confirmada pelo fator de retardamento deste íon no solo. Nota-se na Tabela 10, que o fator de retardamento para o nitrato no Latossolo Vermelho é de 2,03 enquanto, no Neossolo Quartzarênico é de 0,88. Rossi et al., (2007) trabalhando com Latossolo Vermelho Amarelo de textura média e de textura argilosa, encontraram fator de retardamento de 1,20 e 0,93, respectivamente, com uso de amostras deformadas. O valor do fator de retardamento obtido por Rossi et al., (2007) apresenta grande diferença daquele obtido para o Latossolo Vermelho, usado neste trabalho. O maior valor de fator de retardamento encontrado aqui, pode ser explicado, pelo caráter eletropositivo deste solo.

A capacidade de adsorção do nitrato em Latossolo Vermelho foi também observada, aqui nesse trabalho. Apesar de ter sido aplicado $0,8 \text{ g L}^{-1}$ de N (nitrogênio) no Latossolo Vermelho, a concentração máxima de N-NO_3^- na solução do solo foi de aproximadamente $0,4 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto, para a mesma quantidade aplicada no Neossolo Quartzarênico, a concentração máxima na solução do solo foi de aproximadamente 175 mg L^{-1} , valor muito superior ao encontrado no Latossolo Vermelho.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode concluir-se que:

Os modelos de Rhoades-1976 e o de Vogeler et al.-1996 ajustados aos dados de CE_{ss} , CE_s e θ , conjugados com um modelo que relaciona CE_{ss} e concentração do íon, mostraram-se eficazes para estimar, utilizando-se a TDR, a concentração de nutrientes em Neossolos Quartzarênico e Latossolo Vermelho fertirrigados.

A fertirrigação com MAP, quando realizada em qualquer momento durante a irrigação no Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho, possibilita que o fósforo fique adsorvido nos 12 primeiros centímetros de profundidade do solo, após a irrigação.

A fertirrigação com nitrato de cálcio no Neossolo Quartzarênico, possibilitou que, após uma irrigação, o nitrato alcançasse 30 cm de profundidade do solo, quando a aplicação do fertilizante foi realizada no início da irrigação, 21 cm quando a aplicação foi realizada no meio da irrigação, e 12 cm, quando a aplicação foi realizada ao final da irrigação.

A fertirrigação com nitrato de cálcio no Latossolo Vermelho, após uma aplicação, possibilitou que o nitrato ficasse adsorvido nos 12 primeiros centímetros de profundidade do solo, independentemente do momento de aplicação.

6. RECOMENDAÇÕES

Os estudos referentes à distribuição de nutrientes no solo sob fertirrigação merecem ter continuidade, principalmente, quando este está sob cultivo agrícola, avaliando-se diferentes solos e fontes fertilizantes. Uma continuação deste trabalho, em nível de pesquisa científica, seria em avaliar a distribuição do fósforo e nitrato nos

solos sob diferentes momentos da fertirrigação durante a irrigação, após sucessivas irrigações e fertirrigações, assim como quantificar possíveis perdas por lixiviação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, F. M. **Parametrização de modelos de mineralização do nitrogênio orgânico em solo tratado com água residuária da suinocultura**. Viçosa: UFV, 2005. 80p. (Dissertação de Mestrado).

BORGES JUNIOR, J. C. F.; FERREIRA, P. A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. vol.10, n°.3, p.604-611. ISSN 1415-4366. 2006.

BORGES, A. L.; COELHO, E. F.; COSTA, E. L.; SILVA, J. T. A. Fertirrigação da bananeira. Cruz das Almas, BA: (**Circular Técnica, 84**), EMBRAPA-CNPMPF, 2006. 8p.

BORGES, A. L.; OLIVEIRA, A. M. G.; SOUZA, L. da S. Solos, nutrição e adubação da bananeira. Cruz das Almas, BA: (**Circular Técnica, 22**), EMBRAPA-CNPMPF, 1995. 44p.

BORGES, A. L.; COELHO, E. F.; TRINDADE, A. V. **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. Cruz das Almas, BA: EMBRAPA-CNPMPF, 2002. 137p.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ V, V. H., BARROS, N. F., FONTES, R. L. F., CANTARUTTI, R. B., NEVES, J. C. L. (eds.). **Fertilidade do solo**. 1ª ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, v. 1, p. 375-470.

CECÍLIO, R. A., SANTOS, D. B., SOUZA, D. O. Proposta de metodologia para obtenção da curva de calibração de umidade do solo com aparelho de TDR. In:

XXXIII Congresso brasileiro de engenharia agrícola. 2004, São Pedro. 33. **Resumos**, São Pedro: SBEA, 2004. CD-Rom.

COELHO, E. F.; MAGALHAES, A. F. J.; COELHO FILHO, M. A. Irrigação e fertirrigação em Citrus. Cruz das Almas, BA: (**Circular Técnica, 72**), EMBRAPA-CNPMF, 2004. 16p.

COELHO, E. F.; SANTOS, M. R.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, A. J. P. Monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo estimada com uso de TDR em fertirrigação em condições de campo. In: VIII CONGRESO ARGENTINO DE INGENIERÍA RURAL, SAN LUIS, 2005a. **Resumos**, SAN LUIS: 2005. CD-Rom.

COELHO, E. F.; SANTOS, M. R.; SILVA, A. J. P. Estimativa da concentração de NO₃ no solo sob aplicação de nitrato de cálcio no solo usando reflectometria no domínio do tempo. In: XV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, Teresina – PI, 2005b. **Resumos**, Teresina: ABID, 2005. CD-Rom.

COELHO, E. F.; SANTANA, G. S.; SILVA, T. S. M.; RAMOS, M. M. Estimativa da concentração de potássio na solução do solo com base em leituras de condutividade elétrica e umidade por reflectometria no domínio do tempo. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, São Pedro. 33. **Resumos**, São Pedro: SBEA, 2004. CD-Rom.

COELHO, E. F., SANTOS, M. R., TRINDADE, A. V., LEDO, C. A. S. Produtividade do mamoeiro sob diferentes fontes de nitrogênio e potássio e frequências de fertirrigação. In: I Congresso Brasileiro de Fertirrigação, João Pessoa. 2003. **Resumos**, João Pessoa: 2003. CD-Rom.

DIAS, L. E.; BARROS, N. F.; FRANCO, A. A. Curso de especialização por tutoria à distância: Módulo 6 - Nitrogênio no solo. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EDUCAÇÃO AGRÍCOLA SUPERIOR**: Brasília, 1992. 82p.

DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. Análise Química do Solo (Metodologia). **Boletim de extensão**. 2ª edição, Nº 29, 26 p. 1997.

EMBRAPA. 1997. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed., Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212 p.

FERNANDES, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG. 432p, 2006.

FORATTO, L. C.; ZANINI, J. R. NATALE, W. Teor de fósforo e ph no bulbo molhado, com diferentes freqüências de fertirrigação, utilizando ácido fosfórico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.436-444, maio/ago. 2007.

Giese, K., and R. Tiemann. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry, Improved analysis of the step response waveform. **Adv. Molec. Relax. Processes**. 7:45-49. 1975.

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

HOLFORD, I. C. R. Soil phosphorus: its measurement and its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, v.35, p.227–239, 1997.

MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, v.27, p.2771-2777, 1991.

NADLER, A., FRENKEL, H., MANTELL, A. Applicability of the four-probe technique under extremely variable water contents and salinity distribution. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1258–1261. 1984.

OLIVEIRA, J. R. A.; VILELA, L.; AYARZA, M. A. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do distrito federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.6, p.1199-1205, jun. 2000.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba, São Paulo: Ceres, POTAFOS, 1991. 343p.

RAMOS, V. B. N. **Valores de fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de zinco e cobre, obtidos usando-se soluções mono e multi-espécies**. Viçosa: UFV, 1998, 66p. (Dissertação de Mestrado).

REICHARD, K. & TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera. Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri, SP.: Manole, 2004. 478 p.

RHOADES, J. D., RAATS, P. A., PRATHER, R. J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, p.651–655. 1976.

RHOADES, J. D., MANTEGHI, N. A., SHOUSE, P. J., ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society America Journal**, v.53, p.433–439. 1989.

RIBEIRO, A. C., GUIMARÃES, P. T. G., ALVAREZ V, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Comissão de fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa. MG, 1999, 359p.

ROLIM NETO, F. C. SCHAEFER, C. E. G. R. COSTA, L. M. CORRÊA, M. M. FERNANDES FILHO, E. I. IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 28: p 953-964, 2004.

ROLIM NETO, F. C. **Gênese, Química, Mineralogia e Micromorfologia de Topolitosseqüências de Solos do Alto Paranaíba – MG**. Viçosa, UFV, 2002. 143p. (Tese de Doutorado).

ROSSI, P., MIRANDA, J. H., DUARTE, S. N. Curvas de distribuição de fluentes do íon nitrato em amostras de solo deformadas e indeformadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.3, p.675-682, 2007.

ROSSI, C.; ANJOS, A. R. M.; CAMARGO, M. S.; WEBER, O. L. S.; IMHOFF, S.; MALAVOLTA, E. Efeito residual de fertilizantes fosfatados para o arroz: avaliação do

fósforo na planta e no solo por diferentes extratores. **Scientia Agricola**, v.56, n.1, p.1-1, 1999.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análises granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v 29: n 2, p 297-300, 2005.

SANTANA, G. S. **Avaliação de Modelos para estimar a condutividade elétrica e a concentração de potássio na solução do solo usando Reflectometria do Domínio do Tempo (TDR)**. Viçosa, UFV, 2006. 100p (Tese de Doutorado).

SANTANA, G. S.; COELHO, E. F.; SILVA, T. S. M.; RAMOS, M. M; COELHO FILHO, M. A. Estimativa da condutividade elétrica da solução do solo em função da umidade e da condutividade elétrica aparente. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 33, 2004. **Resumos**, São Pedro: SBEA, 2004. CD-Rom.

SANTOS, M. R. ; COELHO, E. F. ; SILVA, A. J. P. ; COELHO FILHO, M. A. Modelos para monitoramento da distribuição de íons no solo sob fertirrigação com fósforo, usando TDR. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2005a, Canoas. **Resumos**, Canoas: SBEA, 2005. CD-Rom.

SANTOS, M. R. ; COELHO, E. F. ; SILVA, A. J. P. Modelos para estimativa da distribuição de íons no solo sob aplicação de nitrato de cálcio usando reflectometria no domínio do tempo. In: XV Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem - Simpósio Internacional de águas Subterrâneas, 2005b. **Resumos**, ABID, 2005. CD-Rom.

SILVA, A. J. P. ; COELHO, E. F. ; SANTOS, M. R. Avaliação de sondas de TDR para medidas da condutividade elétrica aparente e da umidade. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2005, Canoas. **Resumos**, Canoas: SBEA, 2005. CD-Rom.

SOUZA, C. F.; FAVARO, R. B. T. M.; FOLEGATTI, M. V.; DAROZ, T. H. C.; FRANÇA E SILVA, E. F. Uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para avaliar a

distribuição do nitrato no volume molhado do solo sob fertirrigação. **Magistra**, v. 19, n. 2, p. 112-122, abr./jun., 2007.

SOUZA, V. F.; FOLEGATTI, M. V. FRIZZONE, J. A. CORRÊA, R. A. L.; ALENCAR, C. M. Distribuição de fertilizantes em um sistema de fertirrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.1, p.186-189, 2003.

VAN GENUCHTEN, M. TH.; LEIJ, F. J. AND YATES, S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. **Agricultural Research Service Riverside**, California. EPA/600/2-91/065. 1991.

VOGELER, I.; CLOTRIER, B. E.; GREEN, S. R.; SCOTTER, D. R.; TILLMAN, R. W. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.1, p.5-12, 1996.

YAMADA, T., STIPP, S. R., ABDALLA. **Fósforo na agricultura brasileira**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, SP. 2004. POTAFOS. 726p.

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**, Sm. J. v. 62, p. 1108-1115, 1998.

WRAITH, J. M., DAS, B. S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. **Soil and Tillage Research**, v.47, p 145-150. 1998.

NATAL VOLUNTÁRIOS. 13º Tempo - Água Potável. Você tem direito. <http://www.natalvoluntarios.org.br/redecidadecomcoracao/relato.php?idrelato=4&idacao=16>. 11 Jun. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. <http://e-legis.anvisa.gov.br/leisref/public/showAct.php?id=22322&word>. 11 Jun. 2008.

APÊNDICE

Tabela A1. Valores de condutividades elétricas (CE_s) e teores de água (θ) determinados pela TDR e de condutividade elétrica da solução do solo determinada em condutímetro nas colunas de solos após aplicação das soluções de MAP e de Nitrato de Cálcio em diferentes concentração e quantidade de água

Neossolo Quartzarênico						Latossolo Vermelho					
MAP			Nitrato de Cálcio			MAP			Nitrato de Cálcio		
CE_s	θ	CE_{ss}	CE_s	θ	CE_{ss}	CE_s	θ	CE_{ss}	CE_s	θ	CE_{ss}
0,059	0,066	0,377	0,059	0,066	0,377	0,122	0,305	0,034	0,041	0,262	0,056
0,104	0,067	0,587	0,110	0,065	1,406	0,107	0,294	0,043	0,043	0,267	0,070
0,119	0,064	0,813	0,207	0,068	3,132	0,130	0,302	0,059	0,053	0,252	0,202
0,148	0,063	1,777	0,237	0,064	4,804	0,191	0,308	0,108	0,073	0,249	0,431
0,233	0,065	3,575	0,386	0,075	6,276	0,239	0,303	0,249	0,131	0,242	1,449
0,263	0,067	5,328	0,459	0,070	7,668	0,123	0,399	0,037	0,044	0,299	0,056
0,068	0,082	0,326	0,068	0,082	0,326	0,157	0,401	0,046	0,091	0,316	0,086
0,139	0,075	0,803	0,157	0,086	1,608	0,152	0,373	0,044	0,068	0,314	0,239
0,195	0,080	1,537	0,264	0,085	3,226	0,204	0,390	0,072	0,123	0,329	0,769
0,204	0,079	2,580	0,342	0,086	5,049	0,316	0,394	0,234	0,223	0,309	2,020
0,368	0,086	3,637	0,446	0,084	7,520	0,131	0,506	0,044	0,051	0,392	0,059
0,401	0,088	5,201	0,661	0,099	9,871	0,141	0,493	0,051	0,062	0,390	0,107
0,071	0,099	0,309	0,071	0,099	0,309	0,205	0,507	0,057	0,109	0,390	0,263
0,172	0,105	0,284	0,183	0,121	1,680	0,233	0,503	0,104	0,200	0,413	0,895
0,252	0,101	1,630	0,427	0,135	3,691	0,378	0,487	0,366	0,468	0,388	2,697
0,306	0,095	2,799	0,563	0,146	5,405	0,130	0,649	0,061	0,075	0,473	0,066
0,411	0,105	3,214	0,876	0,184	7,226	0,146	0,632	0,047	0,094	0,493	0,160
0,609	0,113	5,427	1,042	0,175	9,733	0,173	0,645	0,125	0,122	0,498	0,312
0,073	0,119	0,318	0,073	0,119	0,318	0,245	0,604	0,232	0,242	0,508	0,819
0,177	0,116	1,052	0,245	0,192	1,493	0,375	0,631	0,517	0,542	0,489	2,651
0,279	0,125	2,430	0,578	0,245	3,548				0,070	0,639	0,077
0,434	0,136	3,398	0,922	0,260	5,858				0,108	0,638	0,247
0,626	0,147	4,538	1,228	0,275	7,431				0,168	0,634	0,168
0,818	0,173	7,182	1,385	0,261	10,790				0,405	0,648	1,594
0,115	0,379	0,152	0,115	0,379	0,152				0,865	0,631	3,864
0,247	0,204	1,040	0,481	0,392	1,413						
0,366	0,163	2,672	1,147	0,399	3,812						
0,488	0,179	4,180	1,639	0,402	4,710						
0,778	0,210	5,719	2,148	0,398	8,246						
0,904	0,215	7,683	2,712	0,395	10,110						
0,365	0,378	1,386									
0,807	0,379	3,583									
1,228	0,395	5,668									
1,463	0,399	7,046									
1,881	0,403	8,977									

CE_s e CE_{ss} em $dS\ m^{-1}$ e θ em $m^3\ m^{-3}$

Avaliação dos modelos de estimativa da condutividade elétrica da solução do solo

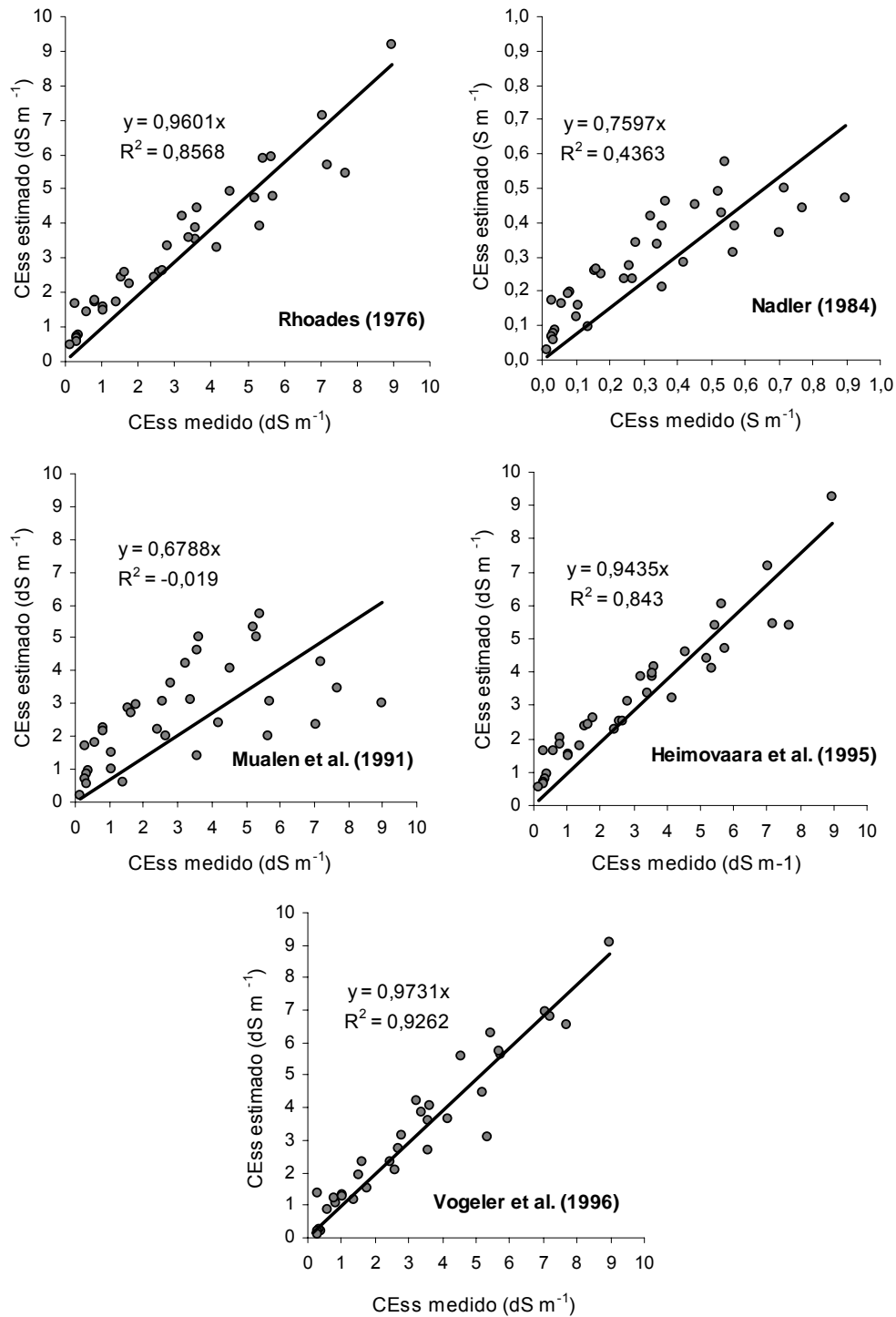


Figura A1. Condutividade elétrica da solução do solo medida e estimada pelos diferentes modelos aplicados ao Neossolo Quartzarênico com aplicação de MAP a altas concentrações.

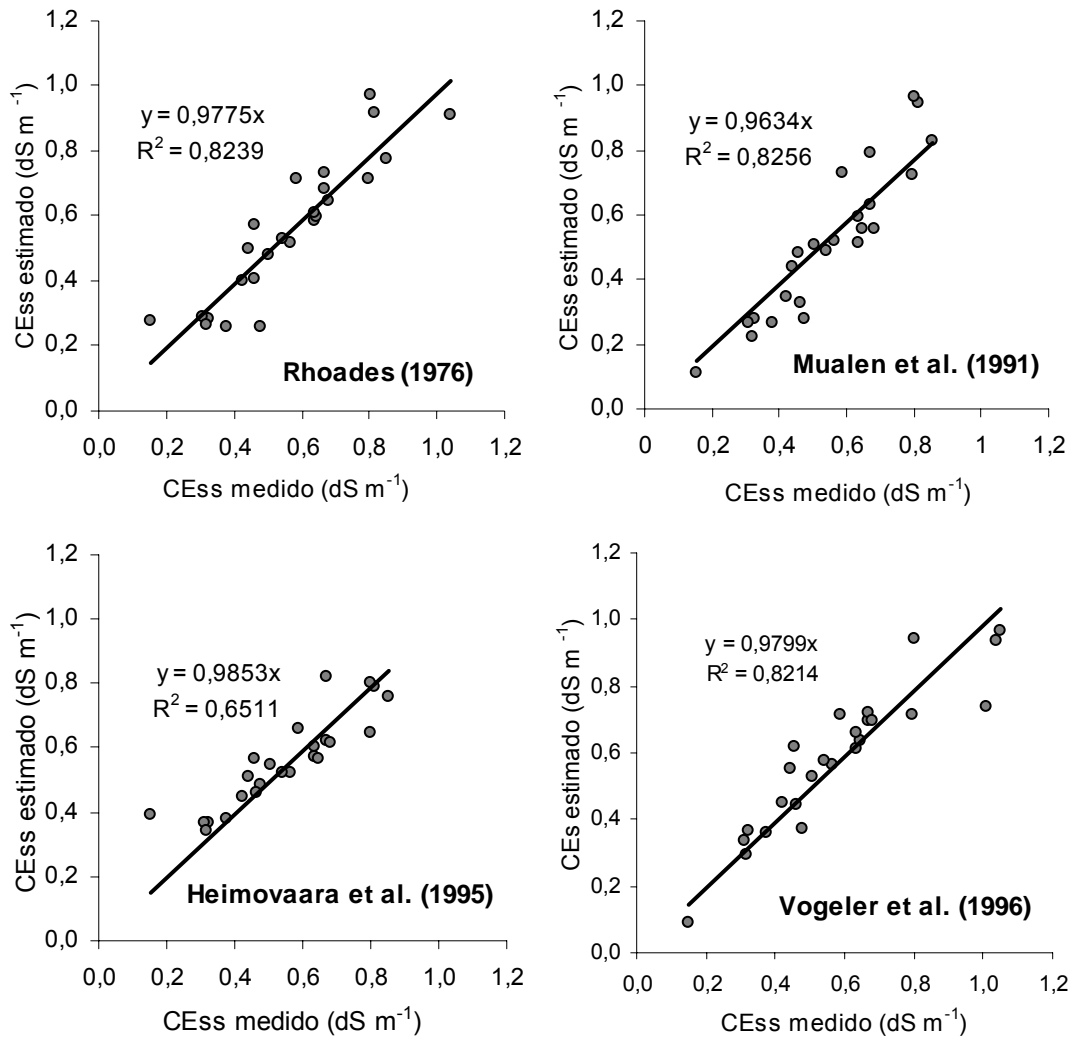


Figura A2. Condutividade elétrica da solução do solo medida e estimada pelos diferentes modelos aplicados ao Neossolo Quartzarênico com aplicação de MAP a baixas concentrações.

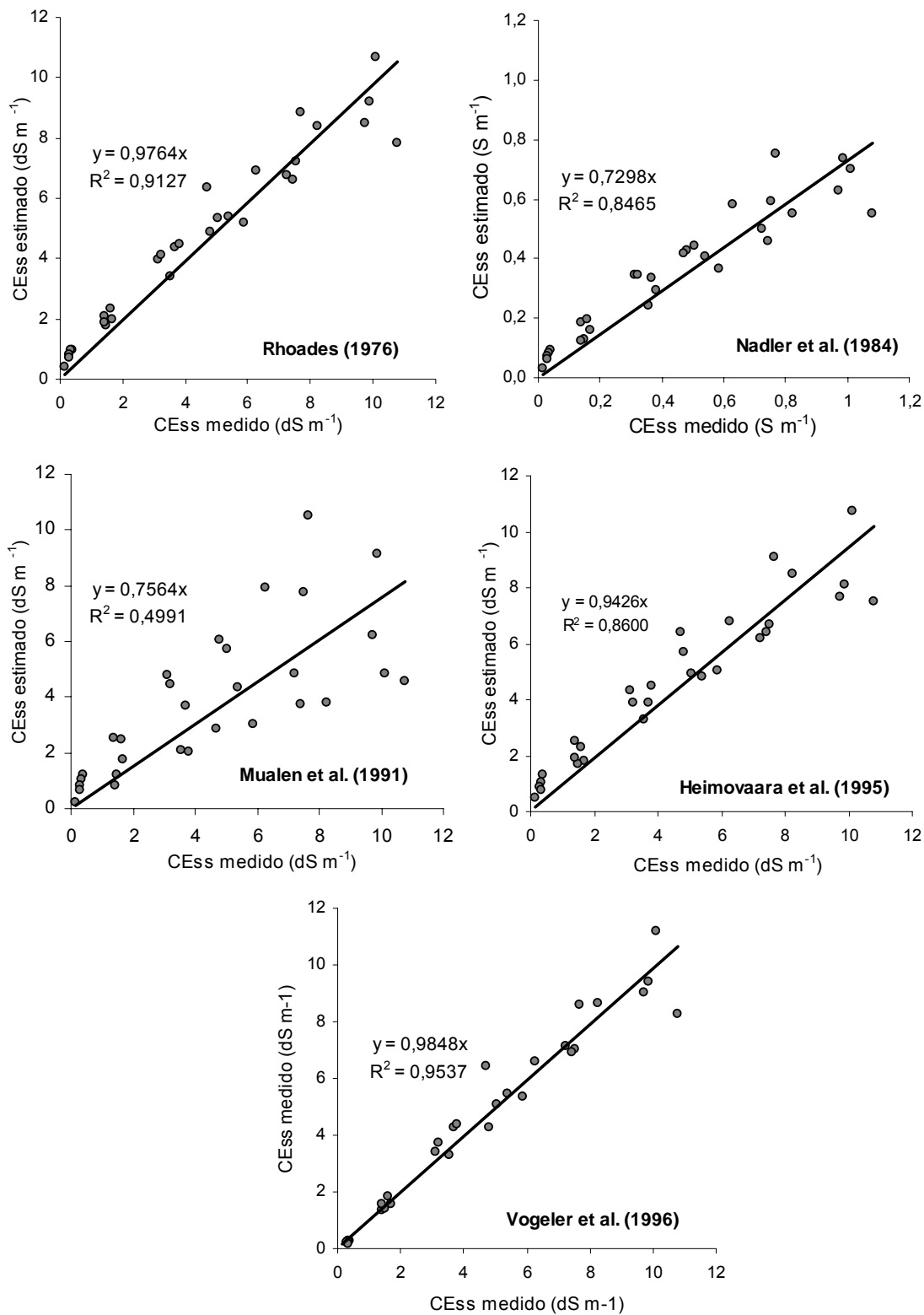


Figura A3. Condutividade elétrica da solução do solo medida e estimada pelos diferentes modelos aplicados ao Neossolo Quartzarênico com aplicação de nitrato de cálcio.

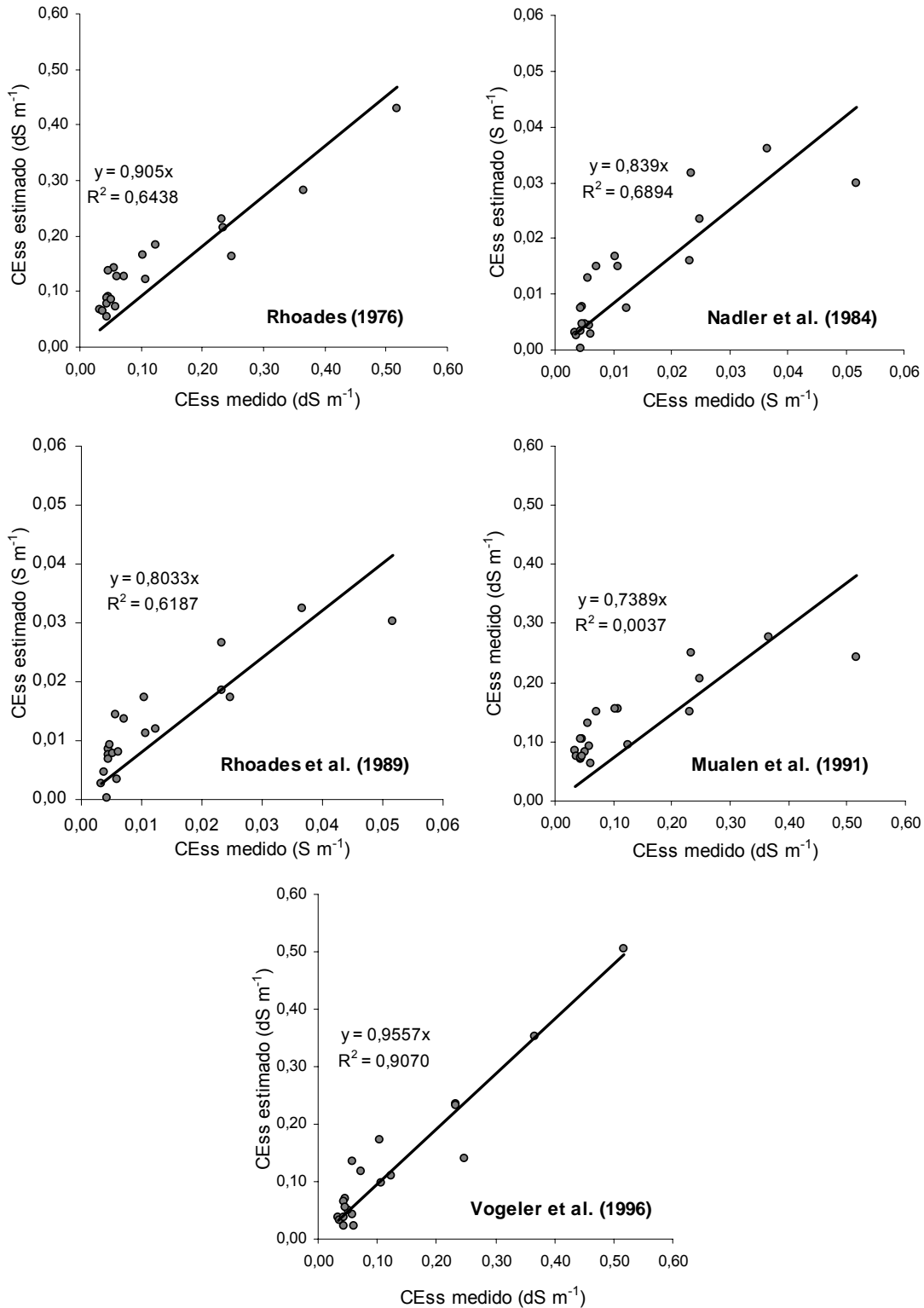


Figura A4. Condutividade elétrica da solução do solo medida e estimada pelos diferentes modelos aplicados ao Latossolo Vermelho com aplicação de MAP.

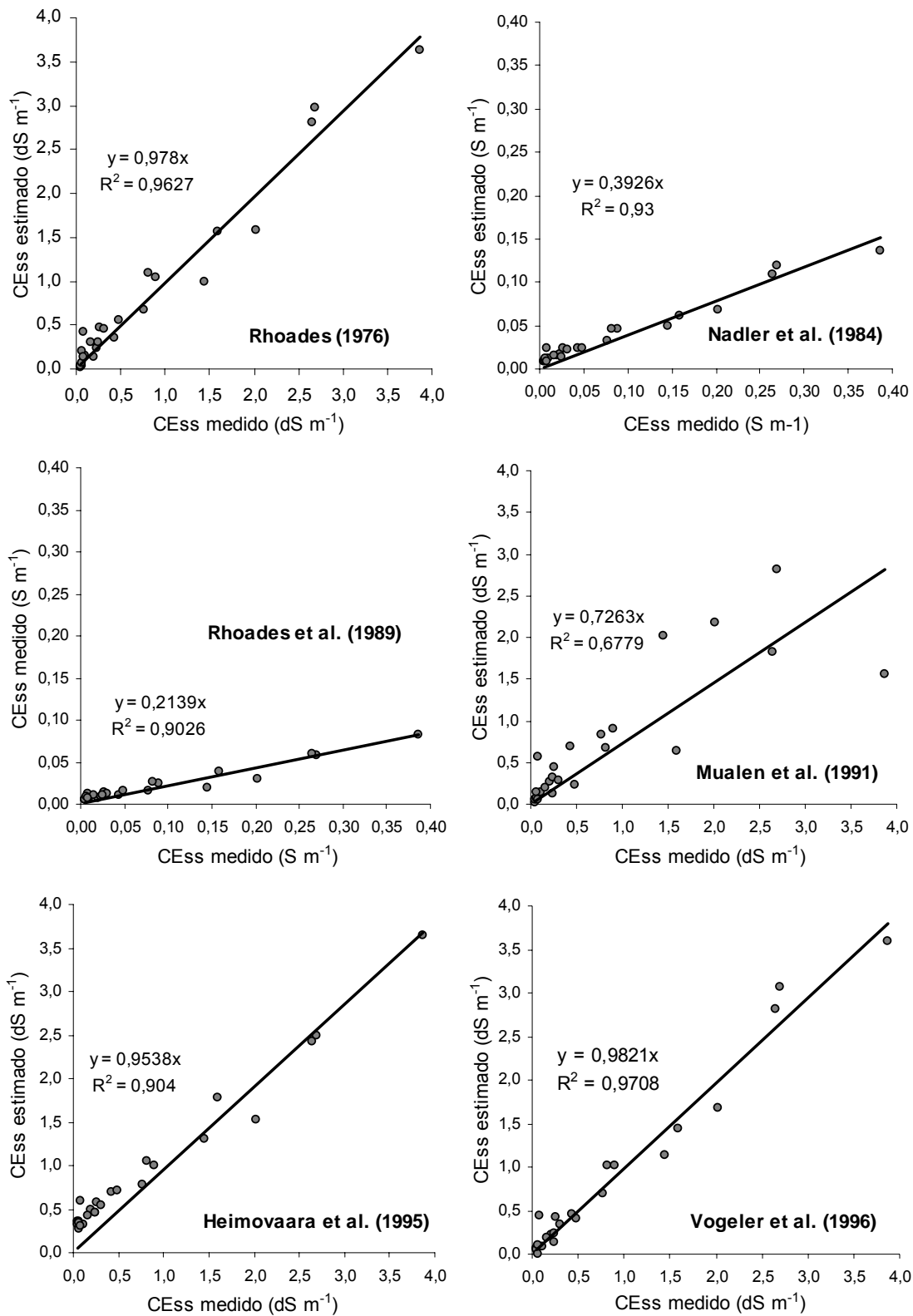


Figura A5. Condutividade elétrica da solução do solo medida e estimada pelos diferentes modelos aplicados ao Latossolo Vermelho com aplicação de nitrato de cálcio.