

GESSIONEI DA SILVA SANTANA

AVALIAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMAR A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
E A CONCENTRAÇÃO DE POTÁSSIO NA SOLUÇÃO DO SOLO USANDO
REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR)

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

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

T

S232a
a 2006

Santana, Gessionei da Silva, 1975 –
Avaliação de modelos para estimar a condutividade elétrica e
a concentração de potássio na solução do solo usando
Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) / Gessionei da
Silva Santana. – Viçosa : UFV, 2006.
100p. : il.

Orientador: Márcio Mota Ramos
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa

1. Fertirrigação. 2. Reflectometria no Domínio do Tempo.
3. Química do solo. 4. Irrigação Agrícola. 5. Solos – Umidade.
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 634.42587
CDD 20.ed. 634.42587

GESSIONEI DA SILVA SANTANA

AVALIAÇÃO DE MODELOS PARA ESTIMAR A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
E A CONCENTRAÇÃO DE POTÁSSIO NA SOLUÇÃO DO SOLO USANDO
REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO (TDR)

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

APROVADA: 18 de agosto de 2006

Dr. Eugênio Ferreira Coelho
(Co-orientador)

Prof. Mauro Aparecido Martinez

Prof. Rubens Alves de Oliveira

Prof. Dalmo Lopes de Siqueira

Prof. Márcio Mota Ramos
(Orientador)

A Deus,

AGRADEÇO.

Aos meus familiares,

amigos e

amigas,

DEDICO.

À Comunidade Técnico-Científica,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pelo dom da vida, pela energia e pela perseverança.

Aos meus pais (Gerson e Zilda), irmãos (José e Sérgio) e irmãs (Dicélia, Nildete e Maricélia), por me incentivarem a obter novos conhecimentos e por me proporcionarem a cada dia momentos de enorme satisfação e alegria.

À minha filha ALÉRCIA, pela alegria, pelo carinho, pelo sorriso, enfim, por consistir na razão do meu viver.

À minha esposa, Eliete, pela presença constante e pelo incentivo transmitido à minha pessoa, para que eu pudesse enfrentar essa árdua tarefa.

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

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

Ao Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura (CNPMPF), pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela valiosa parceria que culminou com a viabilização da minha pesquisa de doutoramento.

Ao Centro Tecnológico do Norte de Minas Gerais (CTNM), pertencente à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), por oportunizar a realização da pesquisa de doutoramento.

À Escola Agrotécnica Federal de Salinas (EAFSalinas), por oportunizar momentos preciosos para a conclusão da redação da tese.

Ao professor Márcio Mota Ramos, pela imensa contribuição e memorável orientação durante os trabalhos realizados no decorrer do curso.

Ao meu Co-orientador, Dr. Eugênio Ferreira Coelho, pela valiosa e inestimável orientação e colaboração.

A todos os professores e funcionários do DEA, pelos preciosos ensinamentos, auxílio e convívio diário durante a realização do curso.

Ao grupo de pesquisa em Irrigação e Fertirrigação do Centro Nacional de Pesquisa em Mandioca e Fruticultura da EMBRAPA, Maurício Coelho, Tibério, Zé Cafua, Julival, Alisson, Lucas, Marcelo, Roque, Val e, especialmente, a Tacísio, pela inestimável colaboração.

Aos funcionários do Centro Tecnológico do Norte de Minas pertencente à EPAMIG, especialmente, a Marco Aurélio, Sival, Orlando, Roberto, Eugênio, Dilermando e Nilma, pela expressiva colaboração.

A todos os meus amigos e amigas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização dos trabalhos.

A todos os meus contemporâneos de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, especialmente aos amigos Élio Cordeiro e à sua esposa, a Sra. Marita Goes, Salomão Medeiros, Paola Lo Monaco, Gustavo Haddar, Patrícia Graça, Geraldo Magela, Delfran Batista, Flávio Gonçalves, Wallisson Freitas, Ismael, Adão Wagner, Jusciara, Júlio César pelo grande e valioso espírito de solidariedade e irmandade.

Enfim, a todos, na certeza de que a vitória não é minha, é nossa!

BIOGRAFIA

Gessionei da Silva Santana, filho de Gerson Brito Santana e Zilda da Silva Santana, nasceu na cidade de Wagner, BA, em 22 de junho de 1975.

Em março de 1992, iniciou seus estudos de nível médio no Curso de Agropecuária, em sua terra natal, concluindo-os em dezembro 1994.

Em março de 1995, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal da Bahia, em Cruz das Almas, BA, concluindo-o em janeiro de 2000.

Em fevereiro de 2000, iniciou o Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa da dissertação em abril de 2002.

De abril a outubro de 2002, atuou como consultor da Organização dos Estados Americanos (OEA), do Programa das Nações Unidas Para o Meio Ambiente (PNUMA), do Global Environment Found (GEF), da Agência Nacional de Águas (ANA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), entidade esta, executora do Sub-projeto 4.1 – Quantificação e análise da eficiência de uso da água pelo setor agrícola na bacia do São Francisco, do Projeto GEF São Francisco.

Em setembro de 2002, iniciou o Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, com área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2006.

Em julho de 2005, ingressou na carreira do magistério como Professor de Irrigação e Drenagem da Escola Agrotécnica Federal de Salinas (EAFSalinas), em Salinas, MG.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	VIII
ABSTRACT	XI
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
ARTIGO 1	6
ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DO SOLO A PARTIR DO TEOR DE ÁGUA E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO	6
RESUMO	6
ESTIMATING SOIL SOLUTION ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM SOIL WATER CONTENT AND BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM SOIL	7
ABSTRACT	7
INTRODUÇÃO.....	8
MATERIAL E MÉTODOS	10
RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
CONCLUSÕES.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
ARTIGO 2	31
RELAÇÃO ENTRE POTÁSSIO NA SOLUÇÃO DO SOLO, TEOR DE ÁGUA E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO ¹	31

RESUMO	31
RELATIONSHIP BETWEEN POTASSIUM IN THE SOIL SOLUTION, SOIL WATER CONTENT AND BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM SOIL.....	32
ABSTRACT.....	32
INTRODUÇÃO.....	33
MATERIAL E MÉTODOS	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54
ARTIGO 3	58
MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E DA SOLUÇÃO DO SOLO.....	58
RESUMO	58
MONITORING THE WATER CONTENT AND BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL SOLUTION.....	59
ABSTRACT.....	59
INTRODUÇÃO.....	60
MATERIAL E MÉTODOS	61
RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
CONCLUSÕES.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
RESUMO E CONCLUSÕES GERAIS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
APÊNDICES	94
APÊNDICE A.....	95
APÊNDICE B.....	96
APÊNDICE C.....	98

RESUMO

SANTANA, Gessionei da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. **Avaliação de modelos para estimar a condutividade elétrica e a concentração de potássio na solução do solo usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)**. Orientador: Márcio Mota Ramos. Conselheiros: Eugênio Ferreira Coelho, Júlio Cezar Neves Lima e Luiz Carlos Chamhum Salomão.

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) é uma técnica que vem se despontando nos últimos anos, como uma atrativa ferramenta no monitoramento do teor de água no solo (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), sendo isso feito, em tempo real, de forma automatizada, rápida e com o mínimo distúrbio da estrutura do solo. Aliado a isto, esta técnica viabiliza, de forma indireta, o conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) e da concentração de nutrientes nesta solução (C_i) (WRAITH & DAS, 1998; MMOLAWA & OR, 2000 e NOBORIO, 2001). Objetivou-se com este trabalho, avaliar, em condições de laboratório e de campo, seis modelos que relacionam θ , CEa e CEw (RHOADES et al., 1976; NADLER et al., 1984, modificado por RHOADES et al., 1989; RHOADES et al., 1989; MUALEN & FRIEDMAN, 1991; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996), quanto à sua capacidade de estimar a CEw e a concentração de potássio na solução do solo (K), a partir de dados de θ e CEa, obtidos por meio da técnica da TDR, bem como, a viabilidade de uso dessa técnica no monitoramento da variação temporal e espacial de θ , CEa e CEw, em condições de campo. Para se estimar K, os modelos foram adaptados com relações entre CEw e K do tipo potência (MMOLAWA & OR, 2000) e linear

(HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996). Na etapa de laboratório, um solo aluvial de classes texturais franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}) foi acondicionado em vasos, de forma a se obter densidades semelhantes às que ocorrem em condições de campo. Com o solo correspondente a cada classe textural, montou-se uma bancada de 25 vasos, nos quais se aplicou cinco soluções de cloreto de potássio, com condutividades elétricas iguais a 1,0; 2,5; 4,0; 5,5 e 7,0 $dS\ m^{-1}$, de forma a se obter cinco teores de água no solo, correspondentes a 20; 40; 60; 80 e 100% da água disponível. Na etapa de campo, duas trincheiras foram feitas em um bananal fertirrigado por um sistema de irrigação do tipo microaspersão. As trincheiras foram abertas na direção diagonal, em relação às linhas de plantio, partindo-se da planta para o microaspersor e, após a instalação das sondas de TDR, estas foram fechadas e mantidas em repouso por um período de 60 dias. Em uma das duas trincheiras, nas quais se monitorou a CEa , θ e CEw , o bananal foi adubado com 432 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O por ano e na outra trincheira, adubado com 1.008 $kg\ ha^{-1}$ de K_2O por ano. Para ambas as etapas (laboratório e campo), leituras de θ e CEa foram feitas por meio de um equipamento de TDR. A solução do solo foi extraída com o uso de extratores para, posteriormente, determinar CEw e K . A CEw foi determinada por meio de condutivímetro de mesa e K por meio de espectrofotômetro de chama. Na etapa de campo, o monitoramento de θ e CEa foi feito em 22 posições de perfis de solo; o equipamento de TDR foi acoplado a quatro caixas multiplexadoras (contendo cada uma oito canais), nas quais foram conectadas 22 sondas de TDR. Por sua vez, o monitoramento da CEw foi feito em seis das 22 posições. Na etapa de campo, em cada trincheira, efetuaram-se leituras de θ , CEa e CEw durante oito dias, cobrindo dois eventos de fertirrigação. As leituras de θ e CEa foram feitas a cada 15 minutos, sendo seus valores armazenados em um datalogger. A solução do solo foi coletada 45 minutos antes e 45 minutos após cada evento de fertirrigação e, a partir daí, em intervalos de 24 horas, até 24 horas após o segundo evento de fertirrigação. Para a etapa de campo, após o ajuste dos modelos aos dados de θ , CEa e CEw e, por conseguinte, obtidos os valores dos parâmetros desses modelos, procedeu-se, com o modelo que melhor se ajustou aos dados de θ , CEa e CEw , a uma estimativa da CEw para todo o perfil do solo monitorado

com a TDR (22 posições). Em seguida, perfis de θ , CEa e CEw foram feitos com os valores de θ e CEa obtidos com a TDR e de CEw estimados. Tais perfis foram feitos para os seguintes momentos: três horas antes e três horas após cada evento de fertirrigação e, a partir daí, em intervalos de 24 horas, até 24 horas após o segundo evento de fertirrigação, para as duas doses de K_2O . A avaliação dos modelos, quanto à sua capacidade de relacionar as variáveis θ , CEa e CEw e θ , CEa e K, foi realizada com base no coeficiente de concordância (D), proposto por WILLMONTT (1981), no coeficiente de determinação (R^2) e no coeficiente angular da equação de uma reta do tipo $Y = aX$, após otimização de seus ajustes, por meio de planilha eletrônica. É possível estimar a CEw, a partir de dados de θ e CEa, para condição de laboratório, por meio dos modelos avaliados, assim como, K, a partir de dados de θ e CEa, para condição de laboratório, por meio dos modelos de RHOADES et al. (1976), VOGELER et al. (1996) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência, nas faixas de 0 a 60 e 0 a 120 $mg L^{-1}$, para solos de CT_f e CT_{fa} , respectivamente. Os modelos estimaram bem a CEw, a partir de θ e CEa, obtidos por meio da técnica da TDR, em condições de campo, sendo que, os modelos de RHOADES et al., (1976) e VOGELER et al., (1996) foram os melhores; é possível monitorar a variação espacial e temporal de θ , por meio da técnica da TDR, em condições de campo, mas, essa capacidade se reduz com o aumento da salinidade do solo, implicando em redução da qualidade dos dados por ela obtidos; e a técnica da TDR apresentou limitação no monitoramento da variação espacial e temporal de CEa e CEw, em condições de campo, principalmente no solo da trincheira, na qual, o bananal foi adubado com $1.008 kg ha^{-1}$ de K_2O por ano.

ABSTRACT

SANTANA, Gessionei da Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August 2006. **Evaluation of models for estimating electrical conductivity and potassium concentration of the soil solution by using time domain reflectometry (TDR)**. Adviser: Márcio Mota Ramos. Co-advisers: Eugênio Ferreira Coelho, Júlio Cezar Neves Lima and Luiz Carlos Chamhum Salomão.

Time domain reflectometry is a technique that has been outstanding in the last years as an attractive tool for soil water content (θ) and for bulk electrical conductivity (ECa) monitoring on real time, automatically, with the minimum soil disturbance. Besides, this technique allows the knowledge of electrical conductivity (ECw) and nutrient concentrations (Ci) of soil solution, indirectly (WRAITH & DAS, 1998; MMOLAWA & OR, 2000 e NOBORIO, 2001). This work had as objective to evaluate six models that relate θ , ECa and ECw (RHOADES et al., 1976; NADLER et al., 1984, modified by RHOADES et al., 1989; RHOADES et al., 1989; MUALEN & FRIEDMAN, 1991; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996), concerning its capability of estimating the ECw and the potassium concentration in the soil solution from data of θ and ECa, obtained by means of TDR technique as well to evaluate the feasibility of using TDR technique for monitoring time and space variation of θ , ECa and ECw, under field conditions. In order to estimate K, the models were adapted with potential (MMOLAWA & OR, 2000) and linear (HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996) functions relating ECw and K. During the laboratory phase, alluvial soil classified as loam (CT_f) and sand loam (CT_{fa}) was packed in pots in order to get the same soil densities from field. Five potassium chloride

solutions of electrical conductivities of 1,0; 2,5; 4,0; 5,5 and 7,0 dS m⁻¹ were applied on 25 pots with each type of soil so that five soil water contents as 20; 40; 60; 80 and 100% of the available water could be obtained. During the field phase, two trenches were dug in a banana orchard that used to be fertirrigated by a microsprinkler irrigation system. The trenches were opened in the direction pseudo stem - emitter and TDR probes were installed in their walls. The trenches were filled and no readings were made for 60 days. The banana crop was fertilized with 432 kg ha⁻¹ of K₂O per year in one trench and in another it was fertilized with 1,008 kg ha⁻¹ of K₂O per year. For both phases (laboratory and field) readings of θ and ECa were done by means of TDR equipment. The soil solution was extracted with water samplers in order to determine ECw and K. The ECw was determined by using a desk conductivimeter and potassium was determined by a flame spectrophotometer. The monitoring of θ and ECa was done in 22 locations of the soil profiles during field phase. TDR equipment was connected to four multiplexers with eight channels each where 22 TDR probes were plugged. ECw was also monitored in these same locations. In each trench, θ , ECa and ECw were read during eight days for two fertirrigation events. The readings were performed in a 15-minute intervals and stored in a datalogger. Soil solution was collected 45 minutes before and after each fertirrigation event and in intervals of 24 hours until 24 hours after the second fertirrigation event. After have fitted the models to data of θ , ECa and ECw and have determined the model parameters, CEw was estimated for the best model in the whole profile monitored with the TDR (22 locations). Afterwards, profiles of θ , ECa and CEw were made for the following moments: three hours before three hours after each fertirrigation event and from that time they were made in 24-hours intervals until 24 hours after the second fertirrigation event. The evaluation of models concerning their capability of relate θ , ECa and ECw and θ , ECa and K was accomplished based upon the agreement coefficient (D) proposed by WILLMONTT (1981), the goodness of fit (R²) and based upon the angular coefficient of the linear equation Y = aX. It s possible to estimate K and CEw from θ and ECa data, under laboratory conditions by using models of RHOADES et al. (1976), VOGELER et al. (1996) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), adapted with a potential relation between in the range of 0 to 60 and 0

to 120 mg L^{-1} , for CT_f and CT_{fa} soils, respectively. The models estimated reasonably CE_w from θ and EC_a obtained by TDR technique under field conditions, but this capability reduces with the increase of soil salinity, reducing data quality, as a consequence. TDR technique showed limitation in the monitoring of spatial and temporal variation of EC_a and EC_w , under field conditions, mainly in case higher amount of K_2O applied ($1,008 \text{ kg ha}^{-1}$).

INTRODUÇÃO GERAL

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 da água no solo. Na agricultura, maior consumidora de água doce do planeta, por exemplo, a otimização do uso da água para fins de irrigação, baseado na melhoria de informações sobre o teor de água no solo (θ), daria substancial contribuição para tal racionalidade, evitando o desperdício observado em diversas situações. Logo, a determinação *in situ* de θ é de grande interesse, para que se obtenha uma agricultura irrigada de precisão (JOAQUIM JÚNIOR, 2003). Sabe-se, entretanto, que os estudos direcionados para o estabelecimento de diretrizes capazes de proporcionar o uso racional dos recursos produtivos não devem se limitar à água, mas, também, a outros, tais como, os agroquímicos (fertilizantes, herbicidas, etc.).

É crescente, também, a quantidade de estudos na área de instrumentação com o objetivo de obter informações sobre o sistema solo-água-planta-atmosfera. O conhecimento de θ é de suma importância para o entendimento da dinâmica de água e solutos no solo (JOAQUIM JÚNIOR, 2003).

Sabe-se que o uso da fertirrigação vem crescendo substancialmente, em todo o País, em pólos agrícolas de produção de frutas e hortaliças, sobretudo em condições de irrigação localizada. Entretanto, informações necessárias para o seu manejo adequado ainda são escassas (FOLEGATTI, 1999). Com isso, é também, cada vez maior, a preocupação com possíveis impactos do uso intensivo dessa técnica sobre o solo e a água, face à possibilidade de

contaminação de lençóis subterrâneos, devido à lixiviação de sais, dentre outros problemas (PINTO, 2001; SILVA, et al., 2005). Vale frisar, ainda, que o uso indiscriminado dessa técnica pode conduzir a um aumento da salinidade do solo para níveis superiores àqueles tolerados pelas espécies cultivadas.

O monitoramento de θ é comumente feito com o uso de tensiômetro ou por meio do método gravimétrico padrão de estufa. O primeiro, tem a limitação de só conseguir cobrir cerca de 40% da água disponível (AD) em solos argilosos e, de perda da escova nos solos arenosos, apesar de que, quando funcionam nestes solos, cobrem cerca de 70% da AD; e o segundo, é limitado por ser destrutivo e por demandar muito tempo (aproximadamente 24 horas) para fornecer o resultado (BERNARDO, 1995).

Por sua vez, a concentração iônica e a salinidade da solução do solo são normalmente monitoradas a partir de amostras de solo ou de solução do solo (RHOADES & OSTER, 1986). No primeiro caso, tem-se o inconveniente de destruir a estrutura do solo, além da limitação no tempo e no espaço, em razão dos resultados representarem uma condição iônica e, ou, salinidade do solo, referente apenas ao momento e ao volume de solo em que foi realizada; e no segundo caso, não é possível conhecer o estado iônico e, ou, a salinidade da solução do solo em tempo real, além de só ser possível em regiões do solo com teores de água associados a potenciais superiores àqueles aplicados nos extratores. Nota-se, portanto, a necessidade de implementação de um método capaz de monitorar de forma contínua a distribuição de água e íons em campos agrícolas para facilitar o manejo da fertirrigação nos solos cultivados.

Uma alternativa para tal fim, é a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) que possibilita com o uso de uma única sonda, determinar simultaneamente o θ e a condutividade elétrica aparente do solo (CEa), em tempo real e de forma automatizada, rápida e com o mínimo distúrbio da estrutura do solo, além de viabilizar, de forma indireta, o conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) e da concentração de nutrientes nesta solução (Ci) (DALTON et al., 1984; WRAITH & DAS, 1998; MMOLAWA & OR, 2000 e NOBORIO, 2001).

A TDR dispõe, ainda, de possibilidade de multiplexação, o que permite o monitoramento de θ e CEa, em diversas posições do solo, em um mesmo

instante de tempo (WRAITH & DAS, 1998) e, a partir destas, monitorar a CEw e a Ci, por meio de modelos que as relacionam com θ e CEa (RHOADES et al., 1976 e VOGELER et al., 1996). O monitoramento da variação espacial e temporal de θ , CEa, CEw e Ci pode viabilizar a estimativa de perdas de água por percolação profunda e da evapotranspiração da cultura, a determinação de regiões de extração de nutrientes, o conhecimento de possível perda de nutrientes por lixiviação, dentre outros.

Diante deste cenário e em pleno limiar do século XXI, é de suma importância a modernização da agricultura, com vistas ao uso racional dos recursos produtivos, por meio do manejo correto de técnicas agrícolas, tais como irrigação e fertilização dos solos, visto que estas são as responsáveis pelo fornecimento dos dois fatores de produção (água e nutrientes, respectivamente) que mais limitam a produção agrícola nos ambientes tropicais. De acordo com SILVA et al. 1998, o uso otimizado de água e fertilizantes nos sistemas agrícolas requer mecanismos precisos de controle desses insumos, passando necessariamente, por um monitoramento freqüente dos mesmos.

Neste sentido, estudos e, ou, medidas adotadas providos com esse senso de racionalidade, mantêm harmonia com o conceito de agricultura de precisão e de desenvolvimento sustentável, o que conduz para maiores competitividades econômica e ambiental, exigidas pelo mercado globalizado e consciente da necessidade de preservação do meio ambiente. Ademais, o lema da tecnologia é: *produzir o máximo e com qualidade, no menor intervalo de tempo, com o menor investimento possível, com o mínimo impacto ambiental e com responsabilidade social.*

Perante esse panorama, objetivou-se com o presente trabalho:

- Avaliar seis modelos que relacionam θ , CEa e CEw, quanto à sua capacidade de estimar a CEw a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR, em condições de laboratório e de campo;
- Avaliar seis modelos que relacionam θ , CEa e CEw, adaptados com relações entre CEw e concentração de potássio na solução do solo

(K), do tipo potência e linear, quanto à sua capacidade de estimar K a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR, em condições de laboratório e de campo; e

- Avaliar a viabilidade de uso da TDR no monitoramento de θ , CEa, CEw e K em áreas agrícolas fertirrigadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV, 1995. 657p.

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

FOLEGATTI, M.V. **Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças**. In: FOLEGATTI, M.V., Apresentação, p.7-8, 1999, 460p.

JOAQUIM JÚNIOR, G.O. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo**. 2003. 81f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.222, n.1-2, p.163-190, 2000.

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

PINTO, J.M. Fertirrigação em fruticultura irrigada. **Revista ITEM**. ABID, Revista Trimestral, n.49, 1º semestre de 2001, p.14-23.

RHOADES, J.D.; OSTER, J.D. Solute content. In Klute, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1, 2ed. Agronomy. Monograph 9. ASA and SSSA, Madison, WI, p.995-1006, 1986.

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**, Madison, v.40, n.5, p.651-655, 1976.

SILVA, T.S.M. da; COELHO, E.F.; PAZ, V.P. da S.; VELLAME, L.M.; SANTANA, G. da S. Teor de potássio na solução do solo com uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo. **Irriga**, Botucatu, v.10, n.4, p.393-402, 2005.

VOGELER, I.; CLOTHIER, 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.

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.

ARTIGO 1

ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DO SOLO A PARTIR DO TEOR DE ÁGUA E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO¹

Gessionei da S. Santana²; Eugênio F. Coelho³; Tibério S. Martins da Silva⁴
& Márcio M. Ramos⁵

RESUMO: O crescente uso da técnica de fertirrigação não tem sido acompanhado com pesquisas para disponibilizar informações capazes de proporcionar o correto manejo dessa técnica. A reflectometria no domínio do tempo (TDR) possibilita o monitoramento simultâneo e contínuo do teor de água (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). A literatura apresenta diversos modelos que relacionam θ e CEa com a condutividade elétrica da solução do solo (CEw), com vistas à predição da CEw a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR. Porém, muitas pesquisas demonstram a necessidade de avaliação e calibração desses modelos para solos de diferentes classes texturais. Nesse trabalho, foram avaliados seis modelos objetivando-se conhecer a capacidade dos mesmos em

¹ Artigo submetido a publicação na Revista de Engenharia Agrícola – REA.

² Eng^o Agr^o, Prof. da Escola Agrotécnica Federal de Salinas, Faz. Varginha, km 02, Rod. Salinas-Taiobeiras, CP 71, CEP 39.560-000, Salinas, MG. Fone: (38) 3841 - 1599, e-mail: gessionei@gmail.com

³ Eng^o Agr., Pesquisador da Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas – BA.

⁴ Eng^o Agr^o, M. Sc., Autônomo, Cruz das Almas – BA.

⁵ Eng^o Agr^o, Prof. da Universidade Federal de Viçosa – DEA, Viçosa – MG.

relacionar θ , CEa e CEw. Experimentos de laboratório foram feitos, com solo de classes texturais franca e franco-arenosa, aplicando-se soluções com cinco condutividades elétricas combinadas com cinco teores de água no solo, resultando em 25 colunas de solo. Os modelos demonstraram capacidade para relacionar θ , CEa e CEw.

Palavras-chave: TDR, modelos matemáticos, manejo de fertirrigação

ESTIMATING SOIL SOLUTION ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM SOIL WATER CONTENT AND BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM SOIL

ABSTRACT: The fertirrigation technique has been increasing, but it has not been followed by researches which can make available information to guide a correct fertirrigation management. The time-domain reflectometry allows the simultaneously monitoring of soil water content (θ) and bulk electrical conductivity (CEa). The literature presents various models which relate TDR readings of θ and CEa to soil solution electrical conductivity (CEw). Nevertheless, many researches demonstrate the need for evaluation and calibration of these models under different soil conditions. In this work, six mathematical models were evaluated in order to establish the relationship among θ , CEa e CEw. Laboratory experiments were carried using two soil materials, by means of applying five electrical conductivities combined with five soil water contents in PVC columns. The models allowed a reasonable relationship among θ , CEa e CEw with better performance of de RHOADES et al. (1976) e de VOGELER et al. (1996) models for the soils 1 and 2, respectively.

Keywords: TDR, mathematical models, fertirrigation management

INTRODUÇÃO

A aplicação de fertilizantes via água de irrigação (fertirrigação), tem crescido substancialmente em pólos agrícolas irrigados, devido, principalmente, às vantagens conferidas por essa técnica e ao incremento no uso de equipamentos de irrigação localizada. Dentre as vantagens da fertirrigação, destacam-se a possibilidade de parcelamento mais adequado das doses de nutrientes que, resulta em maior sintonia da aplicação de fertilizantes com a marcha de absorção de nutrientes das culturas, em maior aproveitamento dos nutrientes pelas plantas e na obtenção de plantas nutridas de maneira mais adequada; economia de mão-de-obra; e redução do tráfego de pessoas e máquinas na lavoura (PINTO, 2001). Por sua vez, a irrigação localizada possibilita, de modo geral, a aplicação de água e fertilizantes com maior eficiência.

Apesar da fertirrigação se mostrar promissora, seu êxito está condicionado à geração de informações capazes de proporcionar o seu manejo de forma mais adequada. O monitoramento de íons no solo constitui-se numa das principais ferramentas no manejo de fertirrigação. Esse tem sido realizado com base em amostragens de solo ou de solução do solo, por meio de extratores (RHOADES & OSTER, 1986).

A amostragem de solo além de ter o inconveniente de destruir a estrutura do solo, é limitada no tempo e no espaço, uma vez que, seus resultados representam uma condição iônica referente apenas ao momento e ao volume de solo em que foi realizada. De forma análoga, a extração de solução do solo também não permite o conhecimento do estado iônico do solo em tempo real, além de só ser possível em regiões do solo com teores de água

associados a potenciais superiores àqueles aplicados nos extratores. Portanto, a implementação de um método capaz de monitorar de forma contínua a distribuição de água e íons em campos agrícolas faz-se necessária para facilitar o manejo da fertirrigação nos solos cultivados.

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) foi inicialmente aplicada ao solo por TOPP & DAVIS (1980) objetivando medir o teor de água no solo, com base no tempo de deslocamento de pulsos eletromagnéticos por uma linha de transmissão (sonda) introduzida no solo, composta de hastes de aço de comprimento conhecido (TOMMASELLI & BACCHI, 2001).

Uma alternativa para o monitoramento do estado iônico do solo, visando o correto manejo da fertirrigação, é a técnica da TDR que além de possibilitar, com o uso de uma única sonda, a determinação simultânea do teor de água (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), em tempo real, de formas contínua, automática e rápida e com o mínimo distúrbio da estrutura do solo, viabiliza, de forma indireta, o conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) (DALTON et al., 1984; WRAITH & DAS, 1998; NOBORIO, 2001; MUÑOZ-CARPENA et al. 2001).

A literatura tem apresentado diversos modelos que relacionam θ , CEa e CEw (RHOADES et al., 1976; RHOADES et al., 1989; NADLER et al., 1984, modificado por RHOADES et al., 1989; MUALEN & FRIEDMAN, 1991; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996).

A técnica da TDR tem sido utilizada com sucesso em várias pesquisas objetivando a determinação da θ e CEa (RHOADES et al., 1976; RHOADES et al., 1989; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996; WRAITH & DAS, 1998; MUÑOZ-CARPENA et al. 2001; PERSSON & UVO, 2003), a modelagem do bulbo molhado (SOUZA, 2002), a modelagem da dinâmica de água e solutos na zona radicular (MMOLAWA & OR, 2000), a identificação do perfil de extração de água pelo sistema radicular das culturas (COELHO & OR, 1996) e a estimativa da evapotranspiração das culturas (WARD & DUNIN, 2001).

Objetivou-se neste trabalho, avaliar seis modelos que relacionam θ , CEa e CEw, quanto à sua capacidade de estimar a CEw a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR.

MATERIAL E MÉTODOS

O solo utilizado no experimento foi coletado no município de Nova Porteirinha, que se localiza na região norte de Minas Gerais. A coleta do solo foi feita em camadas de 0,20 m de espessura, a partir da superfície do solo até 0,80 m de profundidade, o que permitiu obter duas classes texturais para serem estudadas (Tabela 1). O solo coletado na camada superficial (0,0-0,20 m), resultou na classe textural franco-arenosa (CT_{fa}), ao passo que o solo coletado na profundidade de 0,20-0,80 m resultou na classe textural franca (CT_f). As características químicas do solo das duas classes texturais estudadas são apresentadas na Tabela 2. O solo foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira com malha de 2 mm. Segmentos de tubo de PVC com 0,19 m de altura e 0,098 m de diâmetro interno foram preenchidos com 1,9 kg de terra fina seca ao ar (TFSA), até a altura de 0,17 m, perfazendo, um volume de solo no vaso de 0,00128231 m³.

Tabela 1. Características físico-hídricas das classes texturais do solo estudado

Classe Textural	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo	Densidade de partículas	Teor de água no solo	
						- 10 kPa	- 1500 kPa
(g kg ⁻¹)			kg dm ⁻³		(kg kg ⁻¹)		
Franca	427,3	417,3	155,3	1,47	2,39	0,2226	0,1608
Franco-arenosa	544,0	355,0	101,0	1,45	2,43	0,2013	0,1503

Tabela 2. Características químicas das classes texturais do solo estudado

Classe textural	pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+Al	SB	T	V	M.O.
	em água	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³										%
Franca	6,6	24,0	0,59	5,6	0,1	5,7	0,0	0,14	0,88	6,43	7,31	88,0	3,47
Franco-arenosa	6,5	23,0	0,20	6,1	0,3	6,4	0,1	0,08	1,54	6,68	8,22	81,3	5,68

O experimento consistiu de 25 tratamentos (colunas de solo) resultantes da combinação de cinco teores de água no solo (θ) com cinco condutividades elétricas de soluções de cloreto de potássio (CE). Essas condutividades elétricas foram obtidas a partir da aplicação de soluções de cloreto de potássio com cinco concentrações desse fertilizante (C_{KCl}) e os teores de água no solo a partir da aplicação de cinco volumes dessas soluções. Esses tratamentos foram repetidos duas vezes, para a CT_f , resultando em 50 observações, enquanto que, para a CT_{fa} , não houve repetição e, portanto, obtiveram-se 25 observações. Os teores de água no solo foram correspondentes a 20; 40; 60; 80 e 100% da água disponível e as condutividades elétricas das soluções de cloreto de potássio correspondentes a 1,0; 2,5; 4,0; 5,5 e 7,0 $dS\ m^{-1}$.

O teor de água na TFSA foi obtido pelo método gravimétrico padrão de estufa, possibilitando-se a correta complementação do teor de água no solo para os níveis desejados.

Preliminarmente, um ensaio foi realizado para determinar a relação entre concentrações de cloreto de potássio (C_{KCl}) e condutividades elétricas das soluções de cloreto de potássio (CE). Submetendo-se os valores de C_{KCl} e CE à análise de regressão, obteve-se:

$$[C_{KCl}] = \frac{CE - 0,0900}{1,6257} \quad R^2 = 1,00 \quad (1)$$

em que, C_{KCl} e CE correspondem, respectivamente, às concentrações de cloreto de potássio nas soluções, em $g\ L^{-1}$; e às condutividades elétricas das soluções de cloreto de potássio, em $dS\ m^{-1}$.

Com base na Equação 1, pesaram-se quantidades de KCl que foram diluídas em água destilada, obtendo-se as soluções que foram aplicadas sobre a superfície do solo nas colunas de PVC. Em seguida, o solo foi coberto e mantido em repouso por 24 horas, a fim de evitar perda de água por evaporação e de propiciar uma distribuição mais uniforme da solução em toda coluna de solo. Em seguida, efetuaram-se as leituras de θ e condutividade elétrica aparente do solo (CEa) por meio de um equipamento de TDR, utilizando uma única sonda, com três hastes de 0,10 m de comprimento. Simultaneamente, leituras de temperatura foram feitas com um termômetro instalado em uma coluna de solo.

O teor de água no solo (θ) foi determinado por meio da equação de LEDIEU et al. (1986) (Equação 2). Posteriormente, calculou-se a constante dielétrica do solo (ϵ_b), com o uso da Equação 2 e substituíram-se seus valores em uma das Equações 3a ou 3b, conforme o caso, que são as equações de calibração da TDR para leitura de θ , para o solo utilizado no experimento.

$$\theta = 0,1138 \sqrt{\epsilon_b} - 0,1758 \quad (2)$$

$$\theta = -0,1722 + 0,0350 \epsilon_b - 0,0013 \epsilon_b^2 + 2,0 \cdot 10^{-5} \epsilon_b^3 \quad \text{para a CT}_{fa} \quad (3a)$$

$$\theta = -0,1309 + 0,0250 \epsilon_b - 0,0006 \epsilon_b^2 + 9,0 \cdot 10^{-6} \epsilon_b^3 \quad \text{para a CT}_f \quad (3b)$$

Em que, θ corresponde ao teor de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

A CEa foi determinada por meio da equação de GIESE & TIEMANN (1975) (Equação 4). Posteriormente, os valores de CEa foram multiplicados pelos valores do fator de correção de condutividade elétrica quanto aos efeitos da temperatura (f_T), que foi calculado com a Equação 5 (RICHARDS, 1954).

$$CEa = \frac{Z_0}{120 \pi L Z_u} \left(\frac{2 V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (4)$$

em que,

CEa = é a condutividade elétrica aparente do solo, em dS m^{-1} ;

L = é o comprimento da sonda, m;

Z_0 = é a impedância característica da sonda, obtida em água destilada, conforme SOUZA et. al., (2004);

Z_u = é a impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 = é a amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_{inf} = é a amplitude do sinal eletromagnético após a reflexão no início da sonda.

$$f_T = 1 + \frac{(25 - T)}{49,7} + \frac{(25 - T)^2}{3728} \quad \text{para } 20 \leq T \leq 47^\circ\text{C} \quad (5)$$

em que,

f_T = é o fator de correção de condutividade elétrica quanto aos efeitos da temperatura, adimensional; e

T = é a temperatura do meio no qual, a sonda de TDR se encontra inserida, em °C.

Logo após as leituras de θ e CEa com a TDR, a sonda foi retirada e substituída por um segmento de tubo PVC de 12 mm de diâmetro até a profundidade correspondente ao comprimento das hastes da sonda. No orifício feito pelo tubo de PVC, introduziu-se um extrator de solução do solo, devidamente limpo e aplicou-se uma sucção de 70 kPa (RHOADES et al., 1976; HEIMOVAARA et al., 1995; WRAITH & DAS, 1998; VOGELER et al., 1996; MUÑOZ-CARPENA et al., 2001). Após a extração de aproximadamente 15 mL de solução do solo, retirou-se o extrator, homogeneizou-se a solução, armazenando-a em frascos de vidro, previamente limpos, para evitar contaminação por outros íons, determinando-se posteriormente a condutividade elétrica da solução do solo (CEw) por meio de condutímetro de mesa.

Os dados de θ , CEa e CEw foram processados, visando a obtenção da relação existente entre essas variáveis e dos parâmetros dos seis modelos avaliados nesse estudo (Tabela 3).

TABELA 3. Modelos avaliados no estudo⁽¹⁾

MODELO / AUTOR	MODELO	Parâmetros ⁽²⁾	Equação nº
RHOADES et al. (1976)	$CEa = (a \theta^2 + b \theta)CEw + CE_s$	a, b, CE_s ⁽³⁾	(6)
NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989) ⁽⁴⁾	$CEw = f_T (CE_a - \delta CE_s)F(\theta)$	CE_s^3 , ϕ_s , θ_{ws}	(7)
RHOADES et al. (1989)	$CEa = [\theta - (c \theta + d)]CEw + \frac{(\theta_{sol} + c \theta + d)^2}{\theta_{sol}}$	c, d	(8)
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	$CEa = CEw \left(\frac{\theta^\beta}{\theta_s} \right) + CE_s$	β , CE_s ⁽³⁾	(9)
HEIMOVAARA et al. (1995)	$CEa = CEw (\theta - \theta_r)^{\beta+1} \frac{\left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2}{1 - \left(1 - \Theta^{1/q} \right)^q}$	θ_r , β	(10)
VOGELER et al., (1996)	$CEa = (c \theta - d)CEw + (a \theta - b)$	a, b, c, d	(11)

⁽¹⁾ sendo, CEa, CEw e CE_s, em dS m⁻¹ e θ , θ_s e θ_r em cm³ cm⁻³. No modelo de NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989), CEa, CEw e CE_s devem estar em S m⁻¹;

⁽²⁾ Obtidos por otimização, por meio do método dos mínimos quadrados;

⁽³⁾ CE_s corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada com as trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e é normalmente considerada como uma constante para cada solo; e

⁽⁴⁾ Esse modelo já apresenta na sua estrutura o fator de correção da CE quanto ao efeito da temperatura (f_T), conforme RICHARDS (1954).

A fração do solo ocupada pelas suas partículas (θ_{sol}) foi obtida por meio da Equação 12.

$$\theta_{sol} = \frac{D_s}{D_p} \quad (12)$$

em que, D_s e D_p correspondem, respectivamente, à densidade do solo e das partículas, em kg dm^{-3} .

O índice de saturação efetiva (Θ) foi calculado usando-se a Equação 13.

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (13)$$

em que, θ_r e θ_s correspondem, respectivamente, aos teores de água no solo residual e de saturação, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. O θ_s foi obtido por meio da equação de cálculo da porosidade total do solo (Equação 14).

$$\theta_s = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (14)$$

O parâmetro empírico (δ) e o fator $F(\theta)$, que prevê o efeito da tortuosidade dos poros do solo sobre o fluxo de corrente elétrica no meio poroso, foram obtidos por meio das Equações 15 e 16, respectivamente, válidas para $0,2 < CE_{ws} < 0,4 \text{ S m}^{-1}$ e $CE_s < 0,15 \text{ S m}^{-1}$ (RHOADES et al., 1989). A CE_{ws} corresponde à condutividade elétrica da água higroscópica do solo.

$$\delta = \frac{(\phi_s + \theta_{ws})^2}{\phi_s} \quad (15)$$

$$F(\theta) = \frac{1}{(\theta - \theta_{ws})} \quad (16)$$

em que, ϕ_s corresponde ao conteúdo volumétrico da fração sólida do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e θ_{ws} à água higroscópica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

Os parâmetros empíricos m e q foram calculados por meio das Equações 17 e 18, respectivamente (HEIMOVAARA et al., 1995), sendo n e p determinados por otimização pelo método dos mínimos quadrados.

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n} \right) \quad (17)$$

$$q = 1 - \left(\frac{2}{p} \right) \quad (18)$$

A avaliação dos modelos, quanto à sua capacidade de estimar a CEw, a partir de dados de θ e CEa obtidos com a técnica da TDR, foi feita com base no coeficiente de determinação (R^2) e no grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação linear $Y = aX$, após otimização de seus ajustes aos dados medidos, por meio de planilha eletrônica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros dos modelos avaliados e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) são apresentados nas Tabelas 4 e 5, referentes às classes texturais franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}), respectivamente. Verifica-se que, para ambas as classes texturais, os modelos de RHOADES et al. (1976), VOGELER et al., (1996) e MUALEN & FRIEDMAN (1991) foram os que melhor se ajustaram aos dados obtidos, com R^2 superiores a 0,80. O modelo de HEIMOVAARA et al. (1995) não se ajustou bem aos dados observados (R^2 iguais a 0,6209 e 0,4026, para as CT_f e CT_{fa} , respectivamente).

No trabalho de MUÑOZ-CARPENA et al. (2001), em que a relação entre CEa, CEw e θ foi avaliada, mediante a aplicação de soluções de KBr no solo, o modelo linear de RHOADES et al. (1976) foi o que melhor explicou essa relação, comparativamente aos modelos de VOGELER et al., (1996) e RHOADES et al. (1989). MUÑOZ-CARPENA et al. (2001), relatam que o modelo de RHOADES et al. (1976) também tem se destacado em outros trabalhos, tal como o de DE NEVE et al. (2000) e mencionam, ainda, que o menor número de parâmetros desse modelo faz com que não haja justificativa para o uso de outros modelos com maior número de parâmetros.

Tabela 4. Parâmetros e coeficientes de determinação dos modelos ajustados aos dados de θ , CEa e CEw, para a CT_f

MODELO / AUTOR	Parâmetros										R ²
	a	b	c	d	CEs ¹	ϕ_s	θ_{ws}	p	n	β	
RHOADES et al. (1976)	6,0261	-0,3403	-	-	0,1534	-	-	-	-	-	0,8311
VOGELER et al., (1996)	1,0135	0,0675	1,4080	0,0891	-	-	-	-	-	-	0,8277
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	-	-	-	-	0,1456	-	-	-	-	1,6378	0,8077
RHOADES et al. (1989)	-	-	-0,7965	-0,1626	-	-	-	-	-	-	0,7437
HEIMOVAARA et al. (1995)	-	-	-	-	-	-	-	-5,6518	10.000	-0,8268	0,6209
NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989)	-	-	-	-	0,0251	0,6000	0,0010	-	-	-	0,6054

¹sendo, CEs, em dS m⁻¹, exceto para o modelo de NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989), em que, CEs é expressa em S m⁻¹.

Tabela 5. Parâmetros e coeficientes de determinação dos modelos ajustados aos dados de θ , CEa e CEw, para a CT_{fa}

MODELO / AUTOR	Parâmetros										R ²
	a	b	c	d	CEs ¹	ϕ_s	θ_{ws}	p	n	β	
VOGELER et al., (1996)	2,1558	0,2821	-0,6625	-0,4227	-	-	-	-	-	-	0,8504
RHOADES et al. (1976)	1,5911	0,9835	-	-	0,1643	-	-	-	-	-	0,8123
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	-	-	-	-	0,1709	-	-	-	-	1,4839	0,8109
RHOADES et al. (1989)	-	-	-0,9629	-0,1235	-	-	-	-	-	-	0,7537
HEIMOVAARA et al. (1995)	-	-	-	-	-	-	-	-169.493	10.000	-0,7593	0,4026
NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹sendo, CEs, em dS m⁻¹, exceto para o modelo de NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989), em que, CEs é expressa em S m⁻¹.

WRAITH & DAS (1998) aplicando soluções de KNO_3 no solo, avaliaram a relação entre CE_a , CE_w e θ , por meio do modelo de RHOADES et al. (1976) e obtiveram bom ajuste desse modelo aos seus dados experimentais. É importante frisar que, apesar do modelo empírico de VOGELER et al., (1996) ter sido concebido para solos com elevada agregação, este se ajustou bem aos dados, com R^2 próximo daquele obtido pelo modelo de RHOADES et al. (1976). O modelo de MUALEN & FRIEDMAN (1991), também dispõe de apenas dois parâmetros e, no entanto, ajustou-se bem aos dados (R^2 igual a 0,8077).

Quanto ao parâmetro CE_s , presente nos modelos de RHOADES et al. (1976), NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), percebe-se que, seus valores foram relativamente concordantes para os modelos de RHOADES et al. (1976) e MUALEN & FRIEDMAN (1991) (0,1534 e 0,1456 dS m^{-1} , para a CT_f , e 0,1643 e 0,1709 dS m^{-1} , para a CT_{fa} , respectivamente). Resultados similares a esses foram obtidos por PERSSON & UVO (2003), ajustando os modelos de RHOADES et al. (1976) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), aos dados de θ , CE_a e CE_w , em um solo com características texturais semelhantes às do solo estudado nesse trabalho. Já o modelo de NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989), ajustado apenas à CT_f , superestimou esse parâmetro (0,2510 dS m^{-1}), em aproximadamente, 0,1 dS m^{-1} , comparativamente aos outros dois modelos.

A CE_s que corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo é um parâmetro que está associado com as trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo (MUÑOZ-CARPENA et al. 2001). Portanto, a estimativa de uma maior CE_s , sugere um maior potencial de passagem de íons salinos da fração sólida para a fração líquida do solo, resultando assim, em maior CE_w . Os valores de CE_s obtidos pelos modelos de RHOADES et al. (1976) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), para a CT_{fa} , foram ligeiramente maiores que aqueles obtidos pelos mesmos modelos, para a CT_f . Essa constatação reforça os relatos de PONIZOVSKY et al. (1999) e JACOBSEN & SCHJONNING (1993), de que a textura do solo tem influência nos parâmetros de calibração da TDR.

O baixo desempenho do modelo de HEIMOVAARA et al. (1995) aos dados observados pode decorrer do fato desse modelo não conter na sua

estrutura o parâmetro CEs. Ademais, esse modelo fundamenta-se na curva de retenção de água no solo, que pode variar com o solo, resultando, por conseguinte, em limitação para esse modelo.

Nas Figuras 1 e 2, referentes às CT_f e CT_{fa} , respectivamente, traçou-se, para cada θ , os valores dos dados medidos e estimados pelos modelos, utilizando os parâmetros contidos nas Tabelas 4 e 5. Observa-se que, a CE_w varia linearmente com a CE_a . Essa linearidade também foi observada em outras pesquisas (RHOADES et al., 1976; DALTON et al., 1984; VOGELER et al., 1997; NADLER, 1997; MMOLAWA & OR, 2000; MUÑOZ-CARPENA et al., 2001). Verifica-se que, para um mesmo valor de CE_a , a CE_w é tanto menor quanto maior for o teor de água no solo, o que se deve à maior diluição dos sais presentes na solução do solo. Por outro lado, percebe-se que, para um mesmo valor de CE_w , quanto maior o teor de água no solo maior a CE_a , o que se justifica pelo fato da CE_a se referir à condutividade elétrica do meio como um todo, computando, também, a condutividade elétrica proveniente das trocas iônicas na interface sólido-líquido (CEs).

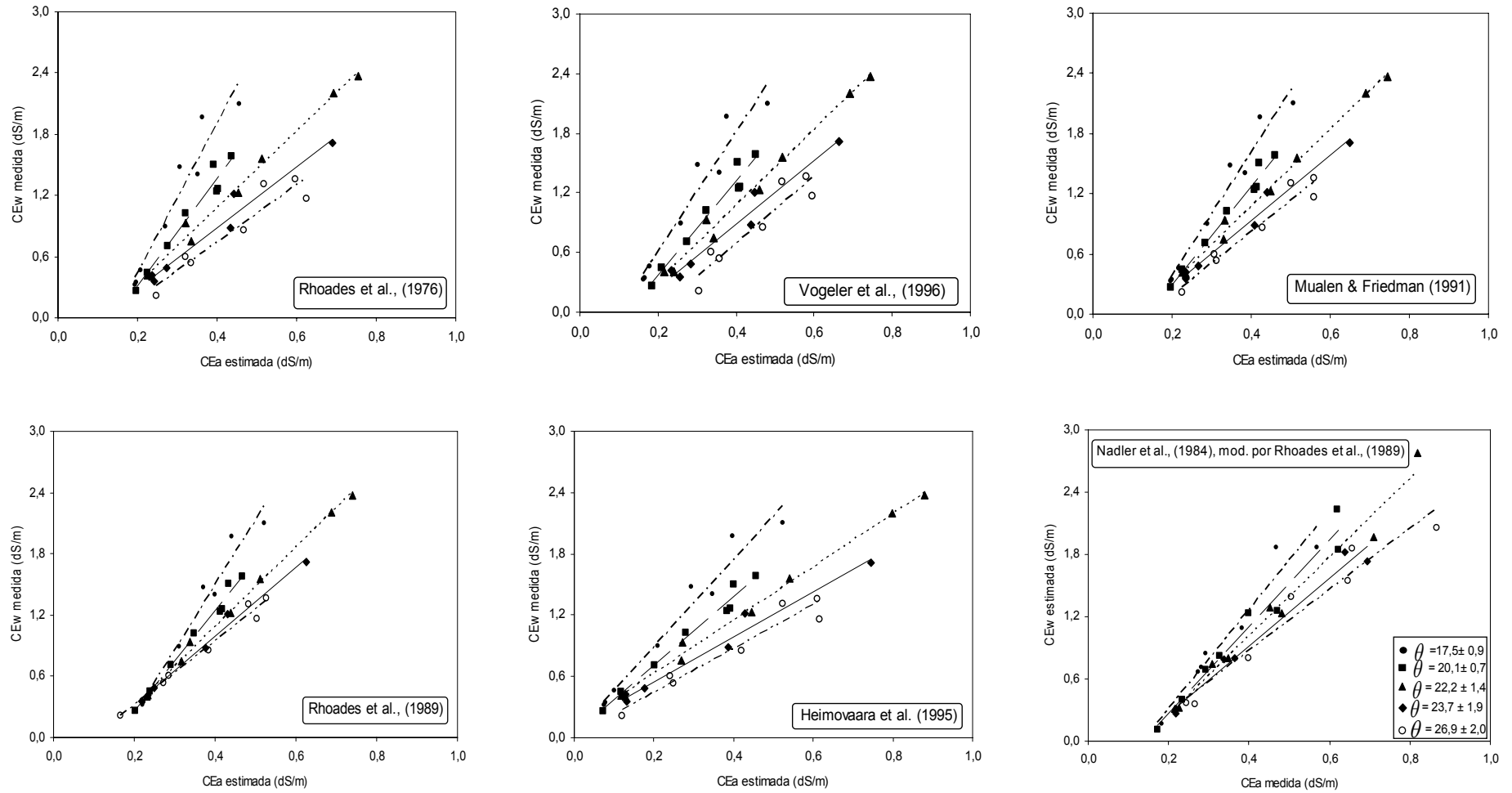


Figura 1. Relação entre CEa e CEw obtida a partir dos ajustes dos modelos que relacionam CEa, CEw e θ , para a CT_f .

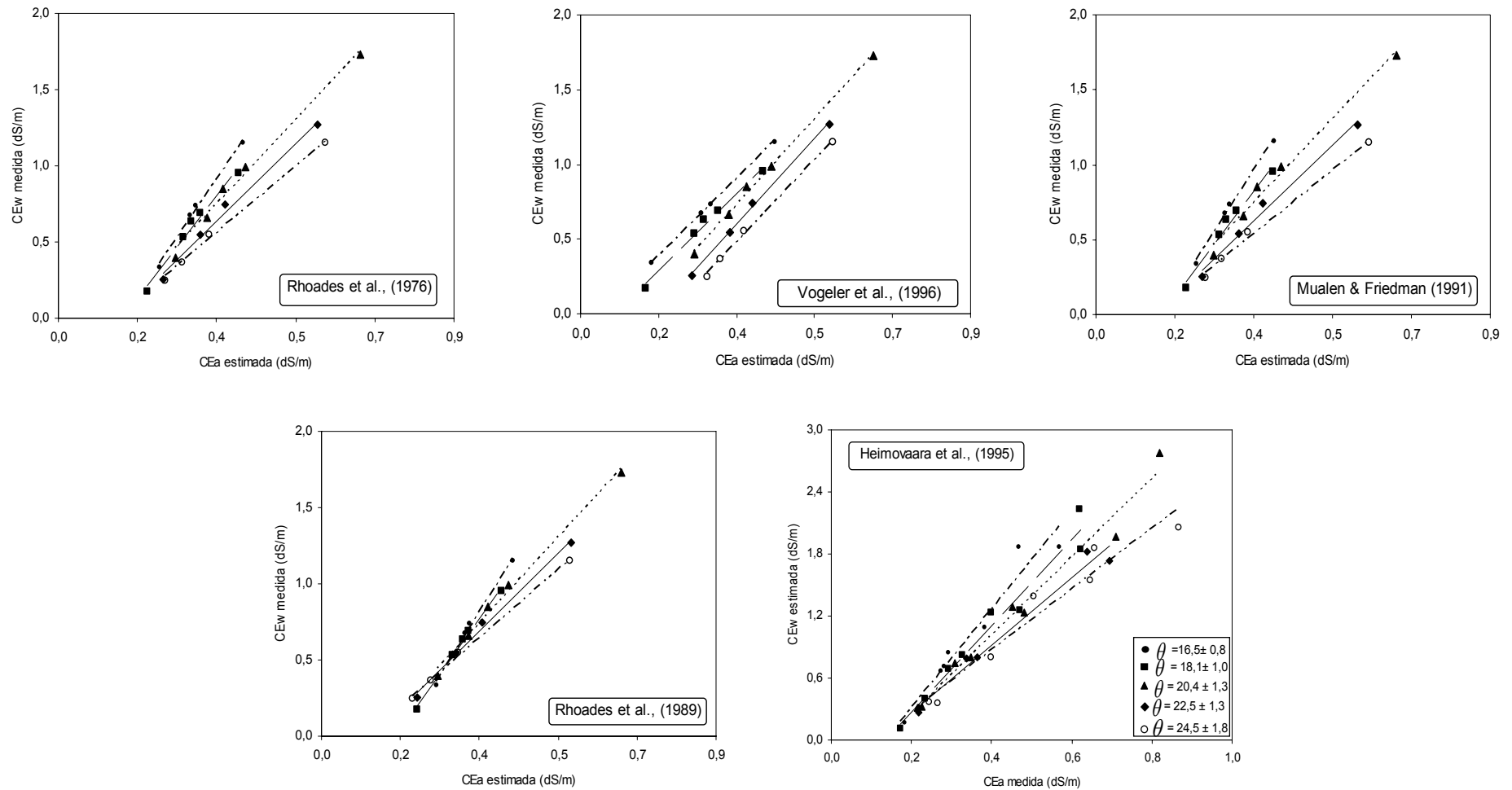


Figura 2. Relação entre CEa e CEw obtida a partir dos ajustes dos modelos que relacionam CEa, CEw e θ , para a CT_{fa} .

Nas Figuras 3 e 4, referentes às CT_f e CT_{fa} , respectivamente, os dados de CEa estimados pelos modelos foram plotados em função dos valores medidos, estabelecendo-se uma função do tipo $Y = aX$. Analisando-se os coeficientes de determinação (R^2) e angulares, obtidos em relação à unidade, ou seja, a discrepância entre as retas 1:1 e estimada, percebe-se que, para a CT_f (Figura 3), os modelos que proporcionaram os melhores ajustes entre dados estimados e medidos foram os de RHOADES et al. (1976) e de VOGELER et al., (1996), com R^2 iguais a 0,9725 e 0,9720 e coeficientes angulares iguais a 0,9725 e 0,9720, respectivamente. O valor do coeficiente angular obtido para o modelo de HEIMOVAARA et al. (1995), igual a 0,9388, foi o que mais destoou em relação à reta 1:1, implicando numa subestimação de 6,12%. O modelo de NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989) proporcionou o menor valor de R^2 (0,9143) e seu coeficiente angular igual a 1,0267, indica que este modelo superestima a CEw em 2,67%, em relação à reta 1:1 (Figura 3).

Para a CT_{fa} (Figura 4), os melhores ajustes entre dados de CEa estimados e medidos foram obtidos com os modelos de VOGELER et al., (1996), RHOADES et al. (1976) e de MUALEN & FRIEDMAN (1991), com R^2 iguais a 0,9798, 0,9747 e 0,9745 e coeficientes angulares iguais a 0,9798, 0,9747 e 0,9752, respectivamente. Assim como observado para a CT_f , para a CT_{fa} , o modelo de HEIMOVAARA et al. (1995) foi o que proporcionou a menor relação entre os valores de CEa estimados e medidos, com R^2 igual a 0,9195 e coeficiente angular igual a 0,9324, o que implica em subestimação de 6,76% em relação à reta 1:1.

Percebe-se em ambas as classes texturais, uma discrepância entre os valores estimados e medidos máxima igual a 6,76% (coeficientes angulares entre 0,9324 e 1,0267), em relação à reta 1:1. Nota-se ainda, que o modelo que apresentou os piores indicadores de ajustes (R^2 e coeficientes angulares) foi o de HEIMOVAARA et al. (1995) (R^2 iguais a 0,9384 e 0,9195 e coeficientes angulares iguais a 0,9388 e 0,9324, para as CT_f e CT_{fa} , respectivamente).

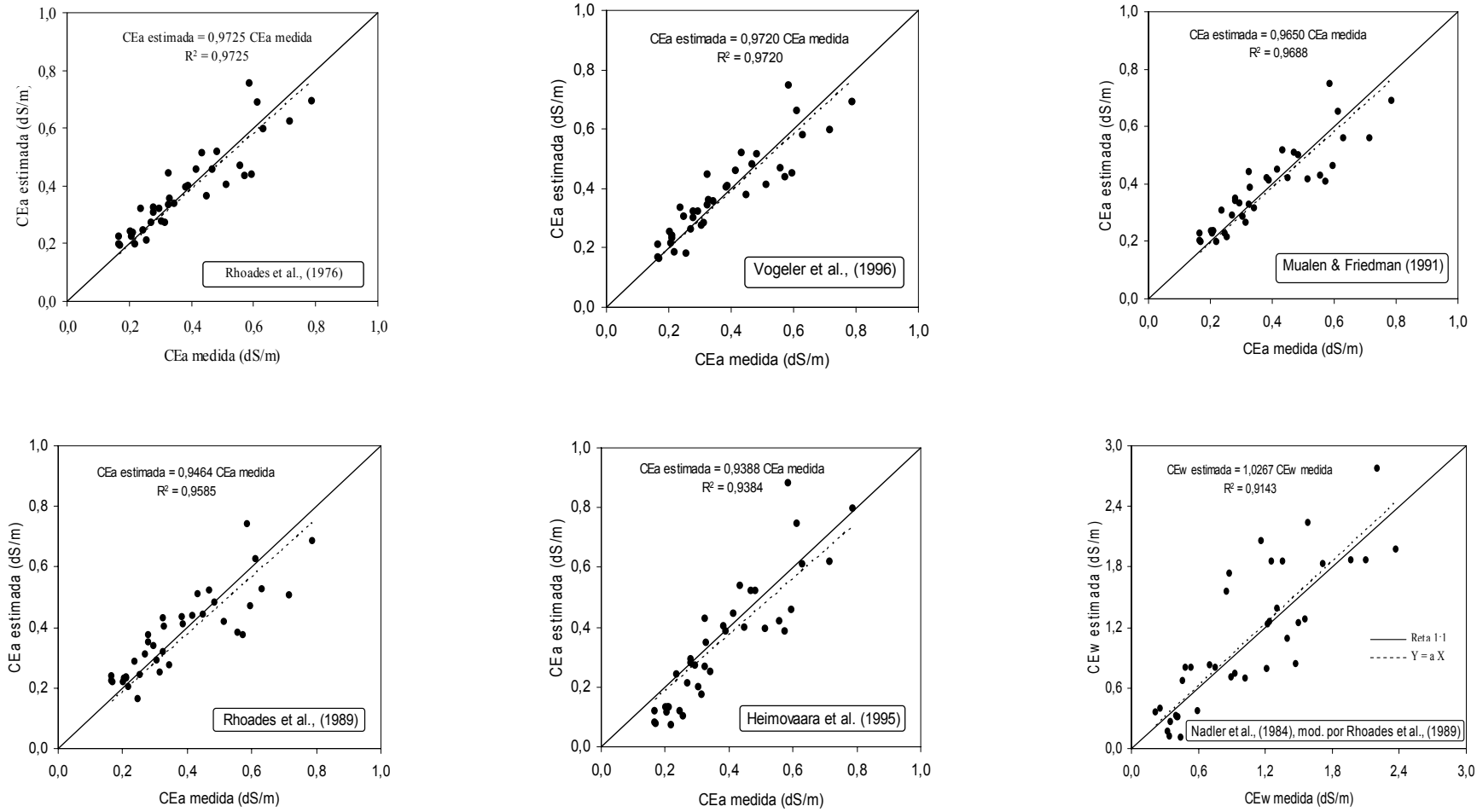


Figura 3. Relação entre as variáveis observada e estimada pelos modelos que relacionam CEa, CEw e θ , para a CT_f.

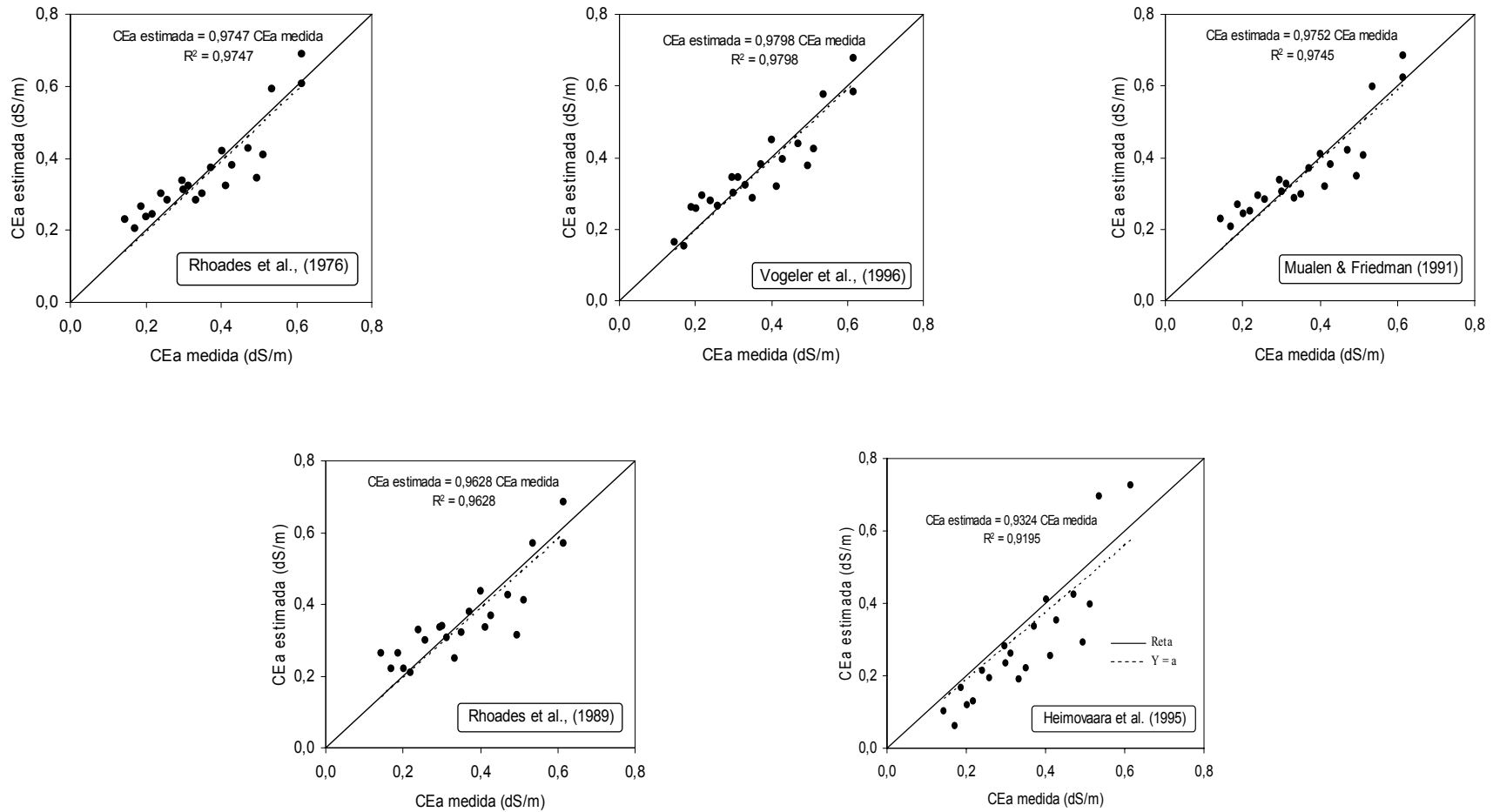


Figura 4. Relação entre as variáveis observada e estimada pelos modelos que relacionam CEa, CEw e θ , para a CT_{fa} .

Analisando-se os coeficientes angulares e o posicionamento da reta estimada, em relação à reta 1:1, das duas classes texturais, verifica-se que, tais coeficientes são inferiores à unidade e que a reta estimada posiciona-se abaixo da reta 1:1, o que sugere uma ligeira tendência de subestimativa da variável CEa, nos modelos que explicitam a CEa (ver Tabela 3). Já quanto ao modelo de NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989), ajustado aos dados da CT_f e que, explicita a CEw, verifica-se comportamento oposto, ou seja, ligeira tendência de superestimativa da variável CEw.

CONCLUSÕES

Os modelos avaliados se mostraram capazes de relacionar θ , CEa e CEw, com vistas à predição da CEw a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica de TDR, em condições de laboratório; e

O modelo de RHOADES et al. (1976) foi o que melhor relacionou θ , CEa e CEw para a classe textural franca (CT_f) e o de VOGELER et al. (1996), para a classe textural franco-arenosa (CT_{fa}), em condições de laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, E.F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, p.1039-1049, 1996.

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

DE NEVE, S.; VAN DE STEENE, J.; HARTMANN, R.; HOFMAN, G. Using time domain reflectometry for monitoring mineralization of nitrogen from soil organic matter. **European Journal of Soil Science**, v.51, p.295-304, 2000.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from the sample time domain reflectometry. **Adv. Mol. Relax. Processes**, v.7, p.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.

JACOBSEN, O.H.; SCHJONNING, P. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. **Journal of Hydrology**, v.151, p.147-157, 1993.

LEDIEU, J.; De RIDDER, P.; De CLERCK, P; DAUTREBANDE, S. A method measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, v.88, p.319-328, 1986.

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

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

MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; ALVAREZ-BENEDÍ, J.; SOCORRO, A.R.; PÉREZ, N. Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: LÓPEZ, J.J. e QUEMADA, M. ed. V, **Temas de Investigación en Zona no Saturada**. p.1-7. Pamplona: Universidade Pública de Navarra, 2001.

NADLER, A. Discrepancies between soil solute concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. **Australian Journal Soil Researches**, v.35, p 527-537, 1997.

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.

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

PERSSON, M.; UVO, C.B. Estimating soil solution electrical conductivity from time domain reflectometry measurements using neural networks. **Journal of Hydrology**, v.273, p.249-256, 2003.

PINTO, J.M. Fertirrigação em fruticultura irrigada. **Revista ITEM**. ABID, Revista

Trimestral, n.49, 1^o semestre de 2001, p.14-23.

PONIZOVSKY, A.A.; CHUDINOVA, S.M.; PACHEPSKY, Y.A. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. **Journal of Hydrology**, v.218, p.35-43, 1999.

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

RHOADES, J.D.; OSTER, J.D. Solute content. In Klute, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Part 1, 2ed. Agronomy. Monograph 9. ASA and SSSA, Madison, WI, p.995-1006, 1986.

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.

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

SOUZA, C.F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento**. 2002. 115f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

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

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Researches**, v.16, p.574-582, 1980.

VOGELER, I.; CLOTHIER, 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.

VOGELER, I.; CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R. TDR estimation of the resident concentration of electrolyte in the soil solution. **Australian Journal Soil Researches**, v.35, p.515-526, 1997.

WARD, P.R.; DUNIN, F.X. Growing season evapotranspiration from duplex soils in south-western Australia. **Agricultural Water Management**, v.50, p.141-159, 2001.

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.

ARTIGO 2

RELAÇÃO ENTRE POTÁSSIO NA SOLUÇÃO DO SOLO, TEOR DE ÁGUA E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO¹

Gessionei da S. Santana² (Foto), Eugênio F. Coelho³, Tibério S. M. da Silva³
& Márcio M. Ramos⁴

¹ Artigo submetido a publicação na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental – AGRIAMBI

² Escola Agrotécnica Federal de Salinas, Fazenda Varginha, km 02, Rodovia Salinas-Taiobeiras, CP 71, CEP 39560-000, Salinas, MG. Fone: (38) 3841 - 1599. E-mail: gessionei@gmail.com

³ Embrapa Mandioca e Fruticultura, CP 07, CEP 44380-000, Cruz das Almas, BA. Fone: (75) 3621 – 8021. E-mail: ecoelho@cnpmf.embrapa.br e tibério_s@hotmail.com

⁴ Departamento de Engenharia agrícola – UFV, CEP 39560-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899 – 1914. E-mail: mmramos@ufv.br

Resumo: Utilizando modelos que relacionam teor de água (θ), condutividade elétrica aparente do solo (CEa) e condutividade elétrica da solução do solo (CEw), objetivou-se estimar a concentração de potássio na solução do solo (K), em duas classes texturais: franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}), em condições de laboratório. Cinco soluções de cloreto de potássio, com condutividades elétricas (1,0; 2,5; 4,0; 5,5 e 7,0 dS m⁻¹), foram aplicadas sobre o solo acondicionado em colunas de PVC, para obter cinco teores de água, correspondentes a 20; 40; 60; 80 e 100% da água disponível. Efetuaram-se leituras de θ e CEa com um aparelho de reflectometria no domínio do tempo (TDR) e se extraiu solução do solo com extrator de cápsula de cerâmica, para determinar a CEw e a concentração de K. Três modelos foram ajustados aos dados. É possível estimar a concentração de K na solução do solo, a partir de θ

e CEa, para condição de laboratório, por meio dos modelos de RHOADES et al. (1976), VOGELER et al. (1996) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência, nas faixas de 0 a 60 e 0 a 120 mg L⁻¹, para solos de CT_f e CT_{fa}, respectivamente.

Palavras-chave: concentração iônica, TDR, manejo de fertirrigação

RELATIONSHIP BETWEEN POTASSIUM IN THE SOIL SOLUTION, SOIL WATER CONTENT AND BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY FROM SOIL

Abstract: The objective of this work was to evaluate the feasibility of estimating the potassium concentration in the soil solution (K), under laboratory conditions, for loam (CT_f) and sand loam (CT_{fa}) soils, through models that relate soil water content (θ), bulk electrical conductivity (CEa) and soil solution electrical conductivity (CEw). Five potassium chloride solutions regarding to five electrical conductivities (1.0; 2.5; 4.0; 5.5 and 7.0 dS m⁻¹), were applied on a soil that was packed in PVC columns in order to obtain five soil water contents, correspondents of the 20; 40; 60; 80 e 100% of the water available. Readings of θ and CEa were done by using time domain reflectometry (TDR) equipment and soil solution was extracted by a water sampler to determine CEw and K. Three models were fitted to the data by an electronic sheet. It is feasible to estimate potassium concentration in the soil solution from θ and CEa for laboratory conditions by the models of RHOADES et al. (1976), VOGELER et al. (1996) and MUALEN & FRIEDMAN (1991) using a potential relationship between CEw and K in the range of 0 to 60 and 0 to 120 mg L⁻¹, for soils of CT_f and CT_{fa}, respectively.

Key words: ionic concentration, TDR, fertirrigation management

INTRODUÇÃO

A fertirrigação vem sendo utilizada, em todo o País, especialmente na Região Nordeste, em pólos agrícolas de produção de frutas e hortaliças. O uso desta técnica é crescente, sobretudo em condições de irrigação localizada. Com a expansão do uso desta tecnologia, a demanda por informações para o seu correto manejo tem aumentado sensivelmente; não obstante, tais informações ainda são escassas (FOLEGATTI, 1999). Os estudos a respeito de fertirrigação têm-se direcionado para a definição de freqüências de aplicação de fertilizantes e de doses e fontes de nutrientes, para condição de fertirrigação. Além disto, é cada vez maior a preocupação com possíveis impactos do uso intensivo dessa técnica sobre o solo e a água, face à possibilidade de contaminação de lençóis subterrâneos, devido à lixiviação de sais, e de ocorrência de desequilíbrio químico e de alterações no pH do solo (PINTO, 2001).

O monitoramento da concentração de íons no solo é de suma importância no manejo da fertirrigação e, a implementação de um sistema automatizado capaz de monitorar, de forma contínua, a distribuição de água e de íons em áreas agrícolas, faz-se necessária para o manejo adequado da fertirrigação. Uma alternativa para tal fim, é a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) que possibilita com o uso de uma única sonda, determinar simultaneamente o teor de água (θ) e a condutividade elétrica aparente do solo (CEa), em tempo real e de forma automatizada, rápida e com o mínimo distúrbio da estrutura do solo, além de viabilizar, de forma indireta, o conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) e da concentração de nutrientes nesta solução (DALTON et al., 1984; WRAITH &

DAS, 1998; MMOLAWA & OR, 2000; MUÑOZ-CARPENA et al. 2001; NOBORIO, 2001).

A técnica da TDR foi aplicada, inicialmente, ao solo, por TOPP & DAVIS (1980) objetivando medir o teor de água, com base no tempo de deslocamento de pulsos eletromagnéticos, através de uma linha de transmissão (sonda) introduzida no solo, composta de hastes de aço de comprimento conhecido (TOMMASELLI & BACCHI, 2001). Posteriormente, esta técnica foi utilizada com sucesso em várias pesquisas, objetivando-se determinar a θ e CEa (RHOADES et al., 1976; RHOADES et al., 1989; VOGELER et al. (1996); HEIMOVAARA et al., 1995; PERSSON & UVO, 2003), modelar a dinâmica de água e solutos iônicos na zona radicular (MMOLAWA & OR, 2000), identificar o perfil de extração de água pelo sistema radicular das culturas (COELHO & OR, 1996) e estimar a evapotranspiração das culturas (WARD & DUNIN, 2001).

WRAITH & DAS (1998) e PERSSON & UVO (2003) relatam que, devido à relação existente entre a CEa e a CEw e entre CEw e concentração iônica da solução do solo (C_i), é possível usar a TDR para monitorar a distribuição de água e solutos iônicos no solo. Contudo, a TDR não determina, de forma direta, CEw e C_i , mas diversos modelos propostos na literatura relacionam θ , CEa e CEw (RHOADES et al., 1976; RHOADES et al., 1989; MUALEN & FRIEDMAN, 1991; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996). Pesquisas mais recentes revelaram também que é possível relacionar, satisfatoriamente, a CEw com a C_i (WRAITH & DAS, 1998; MMOLAWA & Or, 2000; MUÑOZ-CARPENA et al., 2001). HEIMOVAARA et al. (1995) e VOGELER et al. (1996) relatam que a maioria dos autores concorda que é possível relacionar a CEw estimada com a C_i de um íon predominante na solução do solo, obtendo-se bons ajustes com modelos lineares; mas, há a necessidade de calibração destes modelos para tal fim (WRAITH & DAS, 1998; PERSSON & UVO, 2003).

Desenvolveu-se este trabalho, em condições de laboratório, objetivando-se estimar a concentração de potássio na solução do solo (K), a partir de dados de θ e CEa, determinados por meio da técnica da TDR, utilizando-se um solo aluvial de classes texturais franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}).

MATERIAL E MÉTODOS

No experimento foi utilizado um solo aluvial, coletado no Município de Nova Porteirinha, MG. A coleta do solo foi feita em camadas de 0,20 m de espessura, a partir da superfície do solo até 0,80 m de profundidade, o que possibilitou definir duas classes texturais para serem estudadas (Tabela 1). O solo coletado na camada superficial (0,0-0,20 m), resultou na classe textural franco-arenosa (CT_{fa}), ao passo que o solo coletado na profundidade de 0,20-0,80 m resultou na classe textural franca (CT_f). As características químicas do solo das duas classes texturais estudadas são apresentadas na Tabela 2. O solo foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira com malha de 2 mm. Segmentos de tubo de PVC com 0,19 m de altura e 0,098 m de diâmetro interno foram preenchidos com 1,9 kg de terra fina seca ao ar (TFSA), até a altura de 0,17 m, perfazendo, um volume de solo no vaso de 0,00128231 m³.

Tabela 1. Características físico-hídricas das classes texturais do solo estudado

Classe Textural	Areia	Silte	Argila	Densidade do solo	Densidade de partículas	Teor de água no solo	
						- 10 kPa	- 1500 kPa
(g kg ⁻¹)			kg dm ⁻³		(kg kg ⁻¹)		
Franca	427,3	417,3	155,3	1,47	2,39	0,2226	0,1608
Franco-arenosa	544,0	355,0	101,0	1,45	2,43	0,2013	0,1503

Tabela 2. Características químicas das classes texturais do solo estudado

Classe textural	pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+Al	SB	T	V	M.O.
	em água	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³										%
Franca	6,6	24,0	0,59	5,6	0,1	5,7	0,0	0,14	0,88	6,43	7,31	88,0	3,47
Franco-arenosa	6,5	23,0	0,20	6,1	0,3	6,4	0,1	0,08	1,54	6,68	8,22	81,3	5,68

O experimento consistiu de 25 tratamentos (colunas de solo) resultantes da combinação de cinco teores de água no solo (θ) com cinco condutividades elétricas de soluções de cloreto de potássio (CE). Essas condutividades elétricas foram obtidas a partir da aplicação de soluções de cloreto de potássio com cinco concentrações desse fertilizante (C_{KCl}) e os teores de água no solo a partir da aplicação de cinco volumes dessas soluções. Esses tratamentos foram repetidos duas vezes, para a CT_f , resultando em 50 observações, enquanto que, para a CT_{fa} , não houve repetição e, portanto, obtiveram-se 25 observações. Os teores de água no solo foram correspondentes a 20; 40; 60; 80 e 100% da água disponível e as condutividades elétricas das soluções de cloreto de potássio correspondentes a 1,0; 2,5; 4,0; 5,5 e 7,0 $dS\ m^{-1}$ (Figura 1).

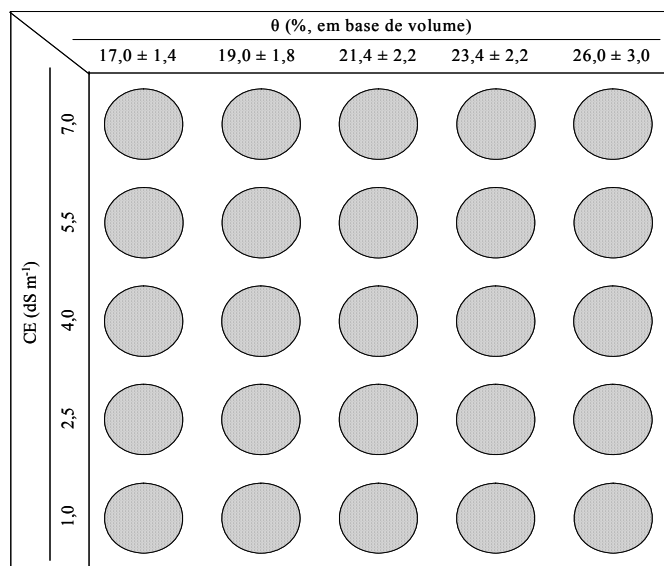


Figura 1. Croqui dos tratamentos provenientes da combinação de cinco θ com cinco CE

O teor de água na TFSA foi obtido pelo método gravimétrico padrão de estufa, possibilitando-se a correta complementação de θ para os níveis desejados.

Preliminarmente, um ensaio foi realizado para determinar a relação entre concentrações de cloreto de potássio (KCl) e condutividades elétricas (CE) de

soluções de KCl. Submetendo-se os valores de concentrações de KCl e CE das soluções de KCl à análise de regressão, obteve-se:

$$[\text{KCl}] = \frac{\text{CE} - 0,0900}{1,6257} \quad R^2 = 1,00 \quad (1)$$

em que, KCl e CE correspondem, respectivamente, às concentrações de cloreto de potássio nas soluções, em g L⁻¹; e às condutividades elétricas das soluções de cloreto de potássio, em dS m⁻¹.

Com base na Equação 1, pesaram-se quantidades de KCl que foram diluídas em água destilada, obtendo-se as soluções que foram aplicadas sobre a superfície do solo nas colunas de PVC. Em seguida, o solo foi coberto e mantido em repouso por 24 horas, a fim de evitar perda de água por evaporação e de propiciar uma distribuição mais uniforme da solução na coluna de solo. Em seguida, efetuaram-se as leituras de θ e CEa por meio de um TDR, utilizando uma única sonda, com três hastes de 0,10 m de comprimento. Simultaneamente, leituras de temperatura foram feitas com um termômetro instalado em uma coluna de solo.

O teor de água no solo (θ) foi determinado por meio da equação de LEDIEU et al. (1986) (Equação 2). Posteriormente, calculou-se a constante dielétrica do solo (ϵ_b), com o uso da Equação 2 e substituíram-se seus valores em uma das Equações 3a ou 3b, conforme o caso, que são as equações de calibração da TDR para leitura de θ , para o solo utilizado no experimento.

$$\theta = 0,1138 \sqrt{\epsilon_b} - 0,1758 \quad (2)$$

$$\theta = -0,1722 + 0,0350 \epsilon_b - 0,0013 \epsilon_b^2 + 2,0 \cdot 10^{-5} \epsilon_b^3 \quad \text{para a CT}_{fa} \quad (3a)$$

$$\theta = -0,1309 + 0,0250 \epsilon_b - 0,0006 \epsilon_b^2 + 9,0 \cdot 10^{-6} \epsilon_b^3 \quad \text{para a CT}_f \quad (3b)$$

Em que, θ corresponde ao teor de água no solo, em cm³ cm⁻³, e ϵ_b à constante dielétrica do solo.

A CEa foi determinada por meio da equação de GIESE & TIEMANN (1975) (Equação 4). Posteriormente, os valores de CEa foram multiplicados pelos valores do fator de correção de condutividade elétrica quanto aos efeitos da temperatura (f_T), que foi calculado com a Equação 5 (RICHARDS, 1954).

$$CEa = \frac{Z_0}{120 \pi L Z_u} \left(\frac{2 V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (4)$$

em que,

CEa = é a condutividade elétrica aparente do solo, em $dS m^{-1}$;

L = é o comprimento da sonda, m;

Z_0 = é a impedância característica da sonda, obtida em água destilada, conforme SOUZA et. al., (2004);

Z_u = é a impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 = é a amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_{inf} = é a amplitude do sinal eletromagnético após a reflexão no início da sonda.

$$f_T = 1 + \frac{(25 - T)}{49,7} + \frac{(25 - T)^2}{3728} \quad \text{para } 20 \leq T \leq 47^\circ C \quad (5)$$

em que,

f_T = é o fator de correção da CE quanto aos efeitos da temperatura, adimensional; e

T = é a temperatura do meio no qual, a sonda de TDR se encontra inserida, em $^\circ C$.

Logo após as leituras de θ e CEa com a TDR, a sonda foi retirada e substituída por um segmento de tubo PVC de 12 mm de diâmetro até a profundidade correspondente ao comprimento das hastes da sonda. No orifício feito pelo tubo de PVC, introduziu-se um extrator de solução do solo, devidamente limpo e aplicou-se uma sucção de 70 kPa (RHOADES et al., 1976; HEIMOVAARA et al., 1995; WRAITH & DAS, 1998; VOGELER et al., 1996; MUÑOZ-CARPENA et al., 2001). Após a extração de aproximadamente 15 mL de solução do solo, retirou-se o extrator, homogeneizou-se a solução, armazenando-a em frascos de vidro, previamente limpos, para evitar

contaminação por outros íons, determinando-se posteriormente a CE_w por meio de condutímetro de mesa.

Preliminarmente, seis modelos matemáticos foram avaliados quanto à sua capacidade de relacionar θ , CE_a e CE_w; a partir desta avaliação, selecionaram-se os três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados de θ , CE_a e CE_w, para fins de estimativa de K (Tabela 3).

Tabela 3. Modelos utilizados para se estimar a concentração de K na solução do solo¹, tendo a variável CE_w explicitada

AUTOR	MODELO	Parâmetros ²	Equação n ^o
RHOADES et al. (1976)	$CE_w = \frac{(CE_a - CE_s)}{(a \theta^2 + b \theta)}$	a, b, CE _s ³	(6)
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	$CE_w = \frac{(CE_a - CE_s) \theta_s}{\theta^\beta}$	β , CE _s ³	(7)
VOGELER et al. (1996)	$CE_w = \frac{[CE_a - (a \theta - b)]}{(c \theta - d)}$	a, b, c, d	(8)

¹ Sendo CE_a, CE_w e CE_s, em dS m⁻¹ e θ e θ_s em cm³ cm⁻³;

² Obtidos por otimização, por meio do método dos mínimos quadrados; e

³ CE_s corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada às trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada uma constante para cada solo.

O teor de água correspondente à saturação (θ_s) foi obtido conforme a Equação 9:

$$\theta_s = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (9)$$

em que, D_s e D_p correspondem, respectivamente, à massa específica do solo e das partículas e são expressas em kg dm⁻³.

Com os valores medidos de CE_w e de K, ajustaram-se equações do tipo potência (MMOLAWA & OR, 2000) e linear (MUÑOZ-CARPENA et al., 2001; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al, 1996; VOGELER et al., 1997 e WRAITH & DAS, 1998):

$$CE_w = \alpha K^\rho \quad (10)$$

$$CE_w = \alpha + \rho K \quad (11)$$

em que α e ρ são parâmetros adimensionais das equações.

Substituindo-se as equações 10 e 11 nas equações 6, 7 e 8, obtiveram-se as equações 12, 13, 14, 15, 16 e 17 (Tabela 4) que, em seguida, tiveram seus ajustes otimizados, explicitando K.

A avaliação dos modelos quanto à sua capacidade de estimar o K, a partir de dados de θ e CEa obtidos com a técnica da TDR, foi feita com base no coeficiente de concordância (D), proposto por WILLMONTT (1981) (Equação 18), no coeficiente de determinação (R^2) e no grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação do tipo $Y = aX$, após otimização de seus ajustes aos dados medidos, por meio de planilha eletrônica.

Tabela 4. Modelos adaptados para se estimar a concentração de K na solução do solo¹, em mg L⁻¹, tendo a variável K explicitada

AUTOR	MODELO	Parâmetros ²	Equação n ^o
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	$K = \left[\frac{1}{\alpha} \frac{(CEa - CE_s)}{(a \theta^2 + b \theta)} \right]^{\frac{1}{\rho}}$	a, b, CE _s ³ , α , ρ	(12)
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	$K = \left[\frac{(CEa - CE_s)}{(a \theta^2 + b \theta)} - \alpha \right] \frac{1}{\rho}$	a, b, CE _s ³ , α , ρ	(13)
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	$K = \left[\frac{1}{\alpha} \frac{(CEa - CE_s) \theta_s}{\theta^\beta} \right]^{\frac{1}{\rho}}$	β , CE _s ³ , α , ρ	(14)
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	$K = \left[\frac{(CEa - CE_s) \theta_s}{\theta^\beta} - \alpha \right] \frac{1}{\rho}$	β , CE _s ³ , α , ρ	(15)
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	$K = \left\{ \frac{1}{\alpha} \frac{[CEa - (a \theta - b)]}{(c \theta - d)} \right\}^{\frac{1}{\rho}}$	a, b, c, d, α , ρ	(16)
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	$K = \left\{ \frac{[CEa - (a \theta - b)]}{(c \theta - d)} - \alpha \right\} \frac{1}{\rho}$	a, b, c, d, α , ρ	(17)

¹ Sendo CEa, CEw e CE_s, em dS m⁻¹ e θ e θ_s em cm³ cm⁻³;

² Obtidos por otimização, por meio do método dos mínimos quadrados; e

³ CE_s corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada às trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada uma constante para cada solo.

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}| + |E_i - \bar{M}|)^2} \right] \quad (18)$$

em que,

M_i = é o valor medido de ordem i ;

E_i = é o valor estimado de ordem i ;

\bar{M} = é a média dos valores medidos; e

n = é o número de valores medidos.

O coeficiente de concordância (D) expressa a exatidão dos valores estimados em relação aos valores medidos, variando de zero, que indica nulidade, a um que indica perfeita exatidão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos parâmetros dos três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), assim como, os valores do coeficiente de concordância (D), para o solo de classes texturais franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}), são apresentados na Tabela 5. De modo geral, nota-se que os modelos estimaram melhor a CEw a partir dos dados do solo de CT_f (R^2 igual a 0,80 e D igual a 0,94) que a partir dos dados do solo de CT_{fa} (R^2 igual a 0,77 e D igual a 0,93). Percebe-se, ainda, equivalência entre os três modelos para o solo de CT_f (R^2 igual a 0,80 e D igual a 0,94), ao passo que, para o solo de CT_{fa} , o modelo de VOGELER et al. (1996) se sobressaiu frente aos demais, com R^2 igual a 0,80, contra 0,77 e 0,75 e D igual a 0,94, contra 0,93 e 0,92, dos modelos de RHOADES et al. (1976) e de MUALLEN & FRIEDMAN (1991) respectivamente.

Valores de CEw estimada, a partir dos valores dos parâmetros contidos na Tabela 5, foram contrapostos com os valores de CEw medida (Figura 2), referente ao solo de classe textural franca (CT_f) (A) e ao solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B). Observa-se a mesma tendência constatada nos resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R^2) dos três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados de θ , CEa e CEw, para os solos de CT_f e CT_{fa}, na estimativa da CEw

Solo de classe textural franca (CT _f)								
MODELO / AUTOR	D	Parâmetros				CEs	β	R^2
		a	b	c	d			
RHOADES et al. (1976)	0,9404	4,4152	0,2958	-	-	0,0902	-	0,8018
VOGELER et al. (1996)	0,9384	0,1930	-0,0488	2,0014	0,1577	-	-	0,7960
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	0,9371	-	-	-	-	0,0844	1,4955	0,7943
Solo de classe textural franco-arenosa (CT _{fa})								
RHOADES et al. (1976)	0,9252	-2,5186	2,4133	-	-	0,0797	-	0,7667
VOGELER et al. (1996)	0,9389	2,2220	0,3552	-1,0447	-0,5858	-	-	0,7996
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	0,9174	-	-	-	-	0,0911	1,2496	0,7463

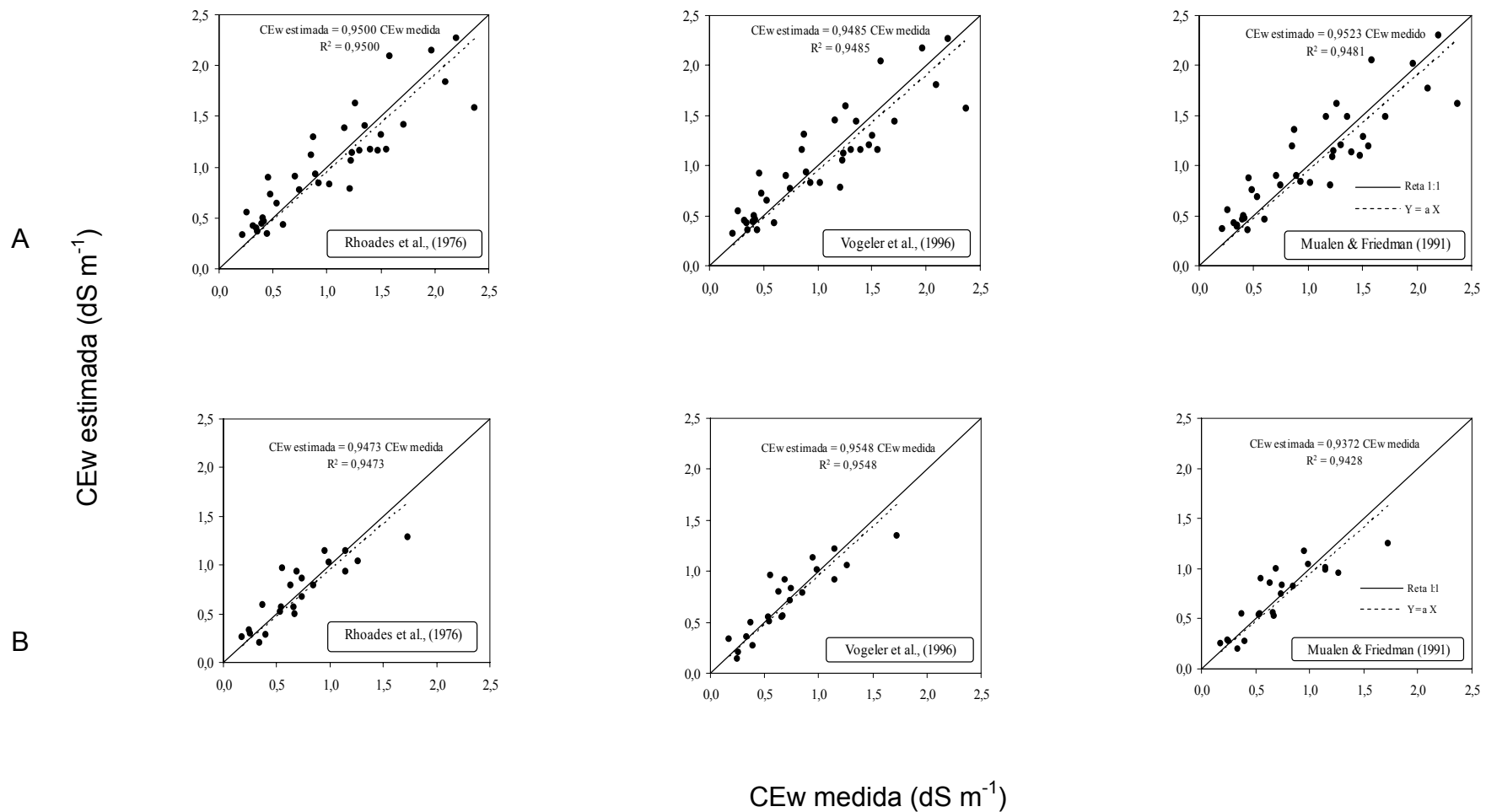


Figura 2. Relação entre a CEw medida e estimada pelos modelos que a relacionam com CEa e θ , para os solos de classe textural franca (CT_f) (A) e de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B)

Relações do tipo potência e linear entre as variáveis CEw e K medidas na solução do solo, são mostradas na Figura 3, referentes ao solo de classe textural franca (CT_f) (A) e ao solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B). Para o solo de CT_f, o modelo que melhor explicou essa relação foi o do tipo potência, com R² igual a 0,81; já para o solo de CT_{fa}, os modelos linear e potência foram equivalentes na explicação desta relação, apesar do modelo tipo potência ser ligeiramente superior (R² igual a 0,98) ao modelo tipo linear (R² igual a 0,97). O ajuste entre CEw e K, para o solo de CT_f, está de acordo com MMOLAWA & OR (2000) mas difere daqueles obtidos por HEIMOVAARA et al. (1995), VOGELER et al. (1996), VOGELER et al. (1997) e WRAITH & DAS (1998), MUÑOZ-CARPENA et al. (2001), que foram do tipo linear; porém para o solo de CT_{fa} o ajuste entre CEw e K está de acordo com todos esses autores, visto que tanto o modelo potência quanto o linear, explicaram bem esta relação. VOGELER et al. (1997) relatam que, em baixas concentrações iônicas, a CEw se relaciona, de forma linear, com a concentração de qualquer sal presente na solução do solo.

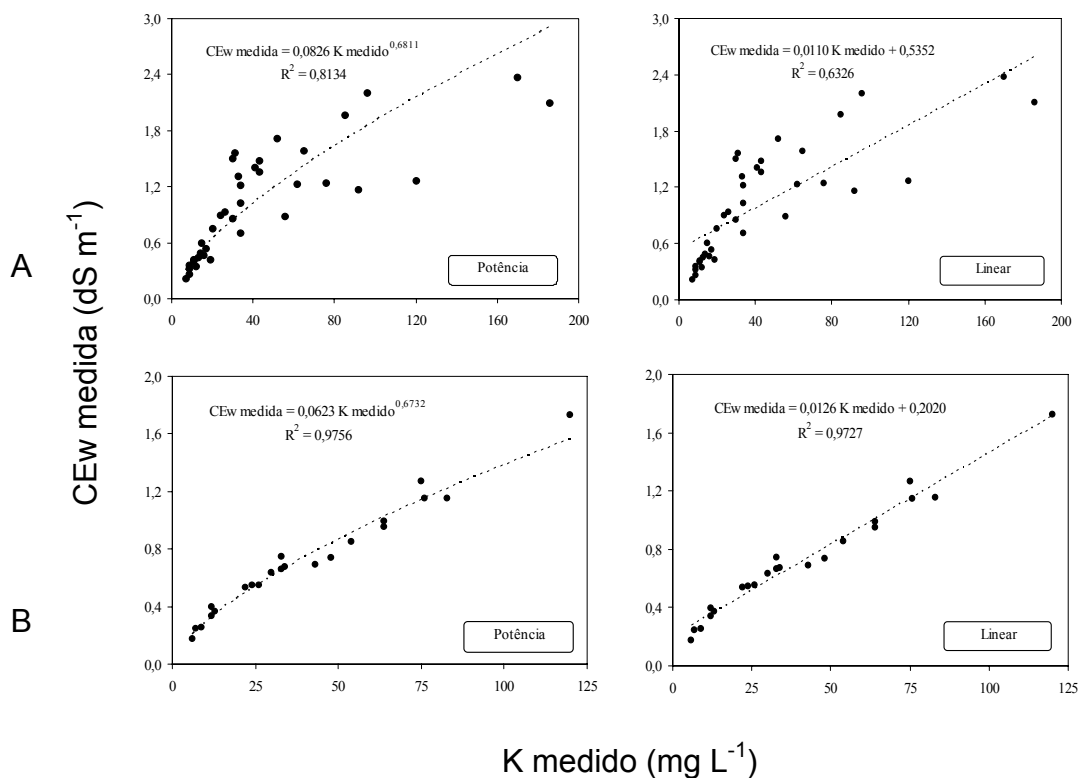


Figura 3. Relação entre CEw e K para os solos de classe textural franca (CT_f) (A) e de classe textural franco-arenosa (CT_{fa}) (B)

Os valores dos parâmetros, do coeficiente de determinação (R^2) e do coeficiente de concordância (D) dos modelos adaptados e avaliados das duas classes texturais são mostrados na Tabela 6. Evidencia-se um melhor ajuste dos dados do solo de textura franco-arenosa (CT_{fa}) e com menor percentual de partículas finas e, portanto, com menor superfície específica, por todos os modelos (R^2 igual a 0,79 e D igual a 0,94), comparativamente àquele obtido para o solo de textura franca (CT_f) e com maior percentual de partículas finas (R^2 igual a 0,60 e D igual a 0,85). Tais constatações podem ser devidas às características físicas e/ou físico-químicas do solo, tal como a capacidade de troca de cátions (CTC), que pode atuar com maior ou menor intensidade na adsorção e/ou dessorção de cátions.

Observa-se, para o solo de CT_{fa} , que uma melhor estimativa da concentração de K na solução do solo a partir de dados de teor de água (θ) e condutividade elétrica aparente (CEa), é obtida quando se introduz, nos modelos adaptados, uma relação do tipo potência entre CEw e K (R^2 igual a 0,81 e D igual a 0,94); mas, para o solo de CT_f , percebe-se que as estimativas de K foram equivalentes quando se introduziu, nos modelos adaptados, qualquer uma das relações entre CEw e K (tipo linear ou potência), exceto para o modelo de RHOADES et al. (1976), adaptado com uma relação entre CEw e K do tipo potência, que foi superior aos demais, em cerca de 7%, quanto ao R^2 , porém, quanto ao coeficiente de concordância (D), com valor médio igual a 0,85, não se observa diferença considerável.

Em relação aos modelos adaptados, verifica-se que os de RHOADES et al. (1976) e de VOGELER et al. (1996) proporcionaram as melhores estimativas de concentração de K na solução do solo, a partir de dados de θ e CEa, para o solo de CT_f e CT_{fa} , respectivamente, com valores de R^2 iguais a 0,66 e 0,82 e de D iguais a 0,85 e 0,95.

Tabela 6. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R^2), para o solo de CT_f e de CT_{fa} , na estimativa da concentração de K na solução do solo

Solo de classe textural franca (CT_f)										
MODELO / AUTOR	D	Parâmetros								R^2
		a	b	c	d	CEs	β	α	ρ	
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,8518	1,8504	0,9550	-	-	0,0920	-	0,0461	0,8425	0,6558
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,8462	0,7820	0,0360	-	-	0,1276	-	0,9597	0,0995	0,5863
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,8434	0,5178	-0,0508	0,9259	0,0690	-	-	0,0459	0,9383	0,5808
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,8448	-16,7941	-1,5471	0,9462	0,0804	-	-	18,1821	0,0358	0,5787
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,8462	-	-	-	-	0,1565	1,9905	0,0485	0,9299	0,5864
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,8460	-	-	-	-	0,1392	1,9058	0,2041	0,0303	0,5859
Solo de classe textural franco-arenosa (CT_{fa})										
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,9432	-1,2478	2,8999	-	-	0,0500	-	0,1023	0,4856	0,8040
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,9254	-2,0016	2,8238	-	-	0,0300	-	0,2777	0,0095	0,7619
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,9465	2,2670	0,3560	-1,0400	-0,5858	-	-	0,0710	0,6342	0,8178
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,9341	1,9918	0,2095	-0,0548	-0,0373	-	-	-0,9437	0,1802	0,7852
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,9429	-	-	-	-	0,0500	0,9196	0,0878	0,4851	0,8033
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,9335	-	-	-	-	-3,5209	0,0849	1,5617	0,0019	0,7830

Tendo em vista o baixo desempenho apresentado pelos modelos adaptados na estimativa do K da solução do solo para o solo de CT_f (Tabela 6), traçou-se um gráfico relacionando os valores de K estimado e medido, por meio de uma função do tipo $Y = aX$, apenas para o modelo de RHOADES et al. (1976), adaptado com uma relação entre CE_w e K do tipo potência, que foi o que melhor estimou a concentração de K na solução do solo (Figura 4). Percebe-se uma considerável dispersão entre os dados medidos e estimados, a partir de uma concentração de K na solução do solo superior a 60 mg L⁻¹. Esta dispersão, além de reforçar os baixos ajustes apresentados na Tabela 6, revela a fragilidade desses modelos na estimativa da concentração de K na solução do solo, quando esta concentração é superior a 60 mg L⁻¹ para solos com características físico-químicas similares às do solo de CT_f.

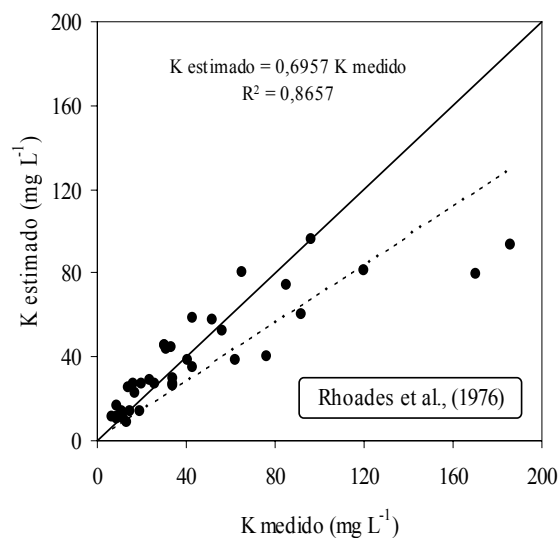


Figura 4. Relação entre o K medido e estimado pela equação 12, para o solo de CT_f

NADLER (1997), também constatou aumento da dispersão dos dados com o incremento do teor de partículas menores; desta forma, o baixo ajuste dos modelos adaptados aos dados do solo de CT_f e, conseqüentemente, com maior teor de silte e argila, comparativamente ao do solo de CT_{fa}, pode ser devido às características físico-químicas desse solo sugerindo, portanto, que

tais características influenciam na estimativa da concentração de K na solução do solo, com esses modelos.

Na Figura 5, os valores de K estimado para o solo de CT_{fa}, por meio dos modelos adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo potência (A) e linear (B), foram plotados como função da concentração de K medida na solução do solo. Nota-se que os modelos adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo potência (Figura 5A) proporcionaram estimativas da concentração de K na solução do solo ligeiramente melhores (R^2 médio igual a 0,93), quando comparados aos modelos adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo linear (R^2 médio igual a 0,92) (Figura 5B). Para este solo, o modelo adaptado de VOGELER et al. (1996) foi o que melhor se ajustou aos dados observados na estimativa da concentração de K da solução do solo.

No que tange ao coeficiente angular, os ajustes dos modelos adaptados foram equânimes (em torno de 0,92), independentemente da relação entre CE_w e K neles introduzida.

Com base no que se constatou na Tabela 6 e na Figura 4, para o solo de CT_f, procedeu-se a uma nova otimização dos ajustes dos modelos adaptados, considerando-se apenas os valores de θ , CE_a e CE_w, associados a concentrações de K na solução do solo, inferiores a 60 mg L⁻¹. Os valores de D, dos parâmetros e de R^2 dessa nova otimização, explicitando CE_w e K, são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

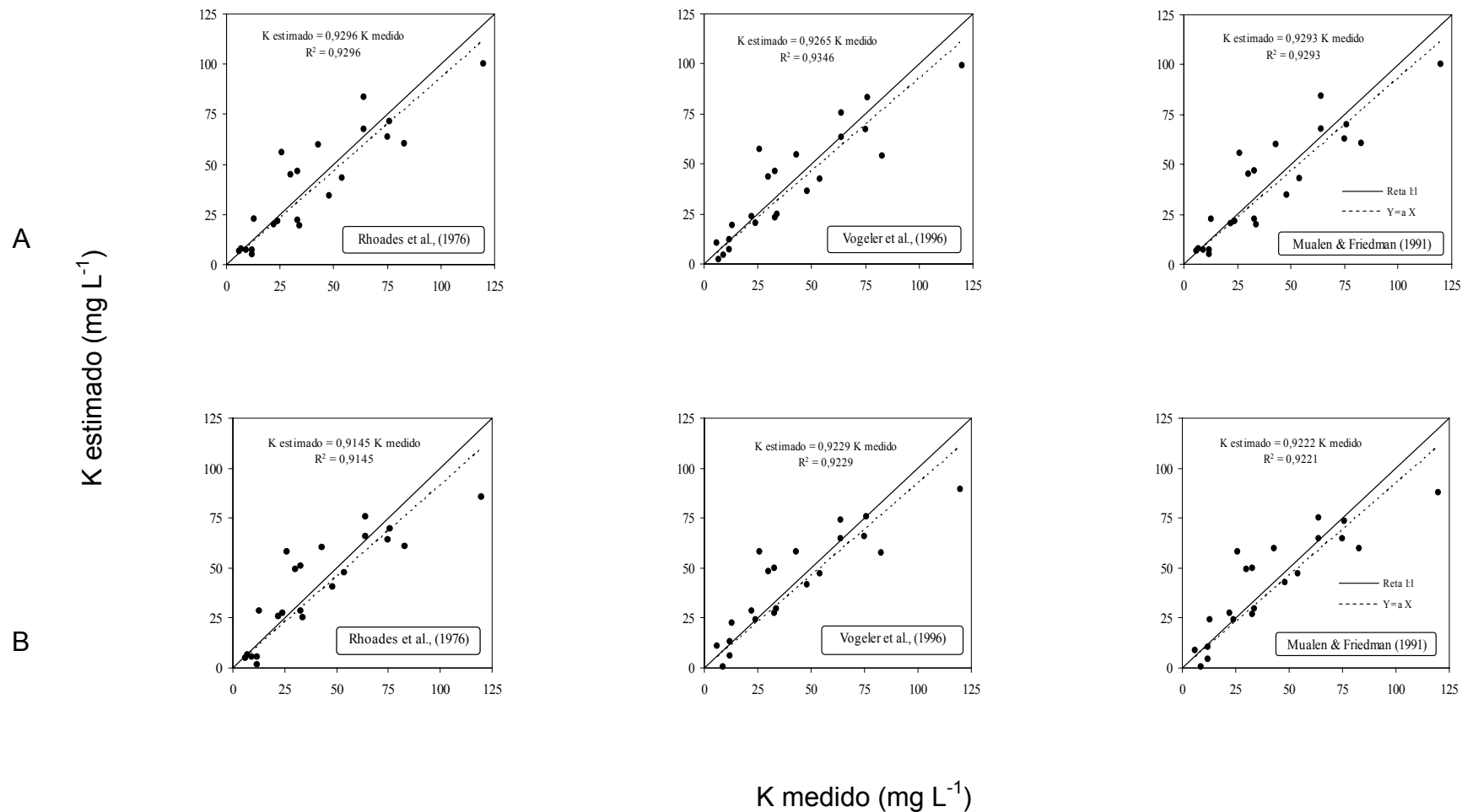


Figura 5. Relação entre o K medido e estimado por meio dos modelos adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo potência (A) e linear (B), para o solo de CT_{fa} .

Tabela 7. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R^2) dos três modelos que melhor se ajustaram aos dados observados de θ , CEa e CEw, para o solo de CT_f, na estimativa da CEw, para concentrações de K na solução do solo, inferiores a 60 mg L⁻¹

Solo de classe textural franca (CT _f)								
MODELO / AUTOR	D	Parâmetros						R ²
		a	b	c	d	CEs	β	
RHOADES et al. (1976)	0,9380	6,2464	-0,2887	-	-	0,1232	-	0,7929
VOGELER et al. (1996)	0,9331	-0,4310	-0,2040	2,7124	0,3368	-	-	0,7823
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	0,9190	-	-	-	-	0,0992	1,5417	0,7516

Tabela 8. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficiente de determinação (R^2) para o solo de CT_f, na estimativa da concentração de K na solução do solo, para concentrações de K inferiores a 60 mg L⁻¹

Solo de classe textural franca (CT _f)											
MODELO / AUTOR	D	Parâmetros								R ²	
		a	b	c	d	CEs	β	α	ρ		
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,9376	3,7011	1,0854	-	-	0,0457	-	0,0661	0,7217	0,7961	
RHOADES et al. (1976) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,9370	0,8923	0,4041	-	-	0,0350	-	0,6106	0,0622	0,7946	
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,9383	-0,1455	-0,0839	2,0490	0,1559	-	-	0,0862	0,7429	0,7972	
VOGELER et al. (1996) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,9373	0,8705	0,0167	0,0729	0,0035	-	-	-4,7204	0,6655	0,7950	
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo potência	0,9378	-	-	-	-	0,0489	1,4382	0,0864	0,7311	0,7964	
MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptado para a relação CEw_K do tipo linear	0,9371	-	-	-	-	0,0398	1,3442	0,2140	0,0233	0,7948	

Apesar dos modelos continuarem estimando adequadamente a CE_w, comparativamente aos ajustes obtidos e apresentados na Tabela 5 (solo de CT_f), verifica-se ligeira redução dos valores de R² e de D, quando se explicita CE_w (Tabela 7); contudo, quando se explicita a concentração de K na solução do solo, substancial melhoria nos ajustes (R² passando de 0,60 para 0,80 e D de 0,85 para 0,94) dos modelos adaptados aos dados de concentração de K na solução do solo é evidenciada (Tabela 8), comparativamente aos obtidos e apresentados na Tabela 6 (solo de CT_f); observa-se, com isso, o quanto esses modelos são frágeis para estimar a concentração de K na solução do solo, quando esta concentração se situa acima de 60 mg L⁻¹. Nota-se, também, que para concentrações de K na solução do solo inferiores a 60 mg L⁻¹, não há diferença expressiva dos ajustes dos modelos aos dados observados, independentemente do tipo de relação entre CE_w e K, neles introduzida (Tabela 8).

Na Figura 6, os valores de K estimado por meio dos modelos adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo potência (A) e linear (B), para concentrações de K na solução do solo inferiores a 60 mg L⁻¹, são plotados como função do K medido por meio de uma equação do tipo $Y = aX$. Não se observa superioridade expressiva de nenhum dos modelos avaliados nem mesmo efeito do tipo de relação entre CE_w e K, neles inserida, significando que qualquer um dos modelos avaliados pode ser utilizado para estimar a concentração de K na solução do solo, a partir de dados de θ e CE_a obtidos com a TDR, independentemente do tipo de relação entre CE_w e K (potência ou linear) neles introduzida. Observa-se satisfatório ajuste da relação entre o K estimado e medido (R² igual a 0,95 e coeficiente angular igual a 0,95) (Figura 6 A e B). Ressalta-se que o fato de se considerar os modelos adaptados capazes de estimar a concentração de K na solução do solo, apenas na faixa de 0 a 60 mg L⁻¹, para o solo de CT_f, além de conferir maior confiabilidade em suas estimativas conferiu, também, melhor ajuste entre dados estimados e medidos. Essas constatações reforçam a afirmação de que a textura do solo tem influência na estimativa da concentração de K na solução do solo, por esses modelos, tornando esses capazes de estimá-la para solos com características texturais similares às do solo de CT_f, apenas quando esta concentração se situa abaixo de 60 mg L⁻¹.

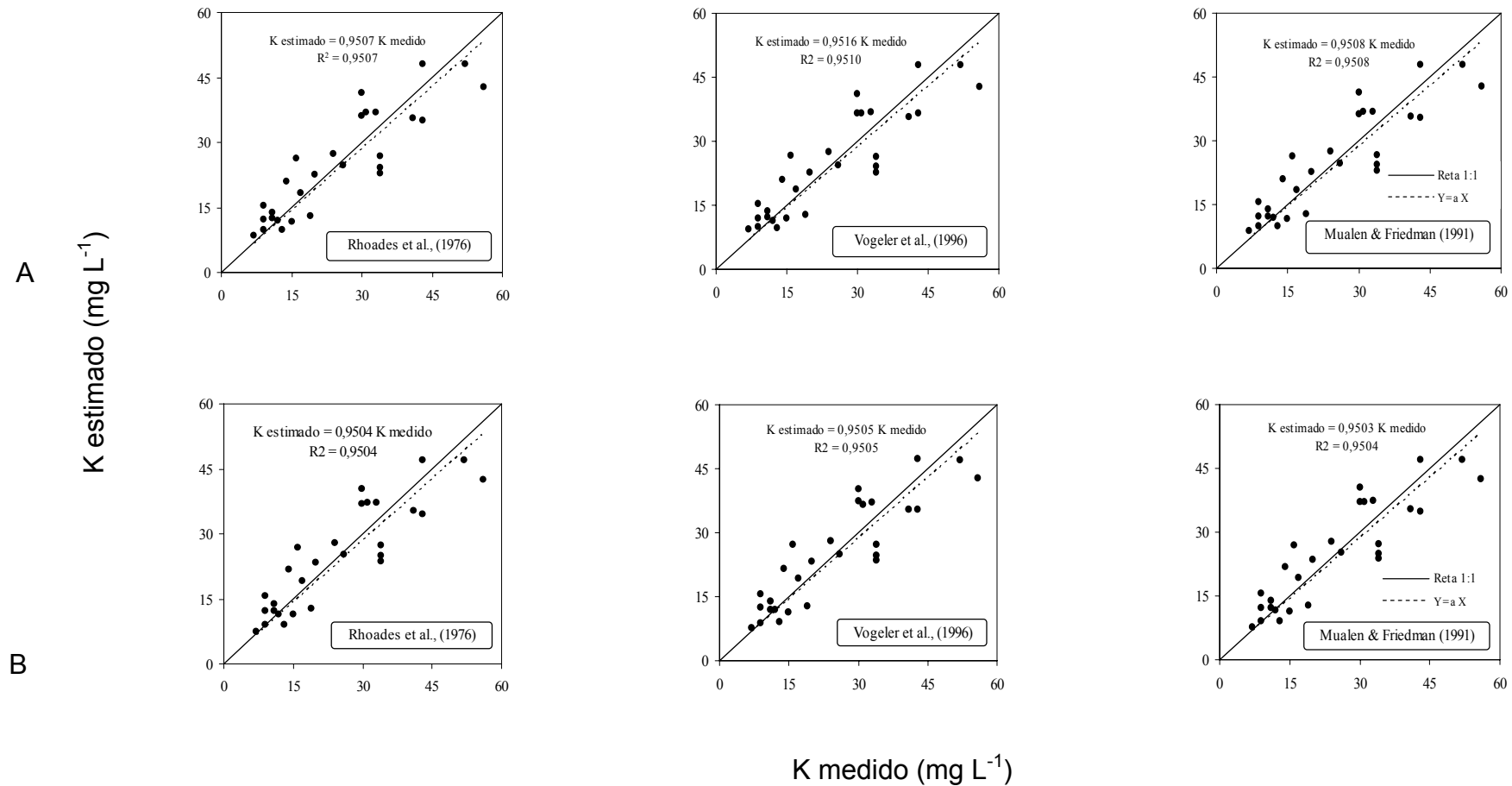


Figura 6. Relação entre o K medido e estimado por meio dos modelos adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo potência (A) e linear (B), para o solo de CT_f, considerando-se apenas os valores de θ , CE_a e CE_w, associados a concentrações de K na solução do solo inferiores a 60 mg L⁻¹.

CONCLUSÃO

É possível estimar a concentração de K na solução do solo, a partir de dados de θ e CE_a, obtidos por meio da técnica da TDR, para condições de laboratório, por meio dos modelos de RHOADES et al. (1976), VOGELER et al. (1996) e MUALEN & FRIEDMAN (1991) adaptados com uma relação entre CE_w e K do tipo potência, para as faixas de 0 a 60 e 0 a 120 mg L⁻¹, para solos de textura franca e franco-arenosa, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, E.F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.6, p.1039-1049, 1996.

DALTON, F.N.; HERKELRATH, W.N.; RAWLINS, D.S.; RHOADES, J.D. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. **Science**, Washington, v.224, n.4651, p.989-990, 1984.

FOLEGATTI, M.V. **Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças**. In: FOLEGATTI, M.V., Apresentação, p.7-8, 1999, 460p.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from the sample time domain reflectometry. **Advanced Molex Relax Processes**, New York, v.7, n.1, p.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**, Madison, v.59, n.3, p.689-698, 1995.

LEDIEU, J.; De RIDDER, P.; DE CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S. A method measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.88, n.1, p.319-328, 1986.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.222, n.1-2, p.163-190, 2000.

MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, Washington, v.27, n.10, p.2771-2777, 1991.

MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; ALVAREZ-BENEDÍ, J.; SOCORRO, A.R.; PÉREZ, N. Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: López, J.J.; Quemada, M. ed. V, **Temas de Investigación en Zona no Saturada**. Pamplona: Universidade Pública de Navarra, 2001, p.1-7.

NADLER, A. Discrepancies between soil solution concentration estimates obtained by TDR and aqueous extracts. **Australian Journal Soil Research**, Canberra, v.35, n.3, p.527-537, 1997.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Madison, v.31, n.3, p.213-237, 2001.

PERSSON, M.; UVO, C.B. Estimating soil solution electrical conductivity from time domain reflectometry measurements using neural networks. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.273, n.1-4, p.249-256, 2003.

PINTO, J.M. Fertirrigação em fruticultura irrigada. **Revista Irrigação & Tecnologia Moderna (ITEM)**. Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem (ABID), v.49, n.1, p.14-23, 2001.

RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, n.2, p.433-439, 1989.

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**, Madison, v.40, n.5, p.651-655, 1976.

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

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

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, n.2, p.574-582, 1980.

VOGELER, I.; CLOTHIER, 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.

VOGELER, I.; CLOTHIER, B.E.; GREEN, S.R. TDR estimation of the concentration of electrolyte in the soil solution. **Australian Journal Soil Research**, Canberra, v.35, n.3, p.515-526, 1997.

WARD, P.R.; DUNIN, F.X. Growing season evapotranspiration from duplex soils in south-western Australia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.50, n.2, p.141-159, 2001.

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

WRAITH, J. M; DAS, B.S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time domain reflectometry. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.47, n.1-2, p.145-150, 1998.

ARTIGO 3

MONITORAMENTO DO TEOR DE ÁGUA E DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E DA SOLUÇÃO DO SOLO

Resumo: Objetivou-se avaliar seis modelos quanto à sua capacidade de estimar a condutividade elétrica da solução do solo (CEw), a partir do teor de água no solo (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), obtidos por meio da técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), e a viabilidade de se monitorar a variação espacial e temporal de CEa, θ e CEw, em condições de campo, por meio da TDR. Durante oito dias, efetuou-se leituras de θ e CEa, a cada 15 minutos, em 22 posições de um perfil de solo (instalando-se 22 sondas de TDR) cultivado com a cultura da bananeira, sob fertirrigação potássica. A CEw foi monitorada durante oito dias, em seis dessas posições, por meio de extratores de solução, sendo as amostras de solução do solo coletadas 45 minutos antes e 45 minutos após cada evento de fertirrigação e, em seguida, a cada 24 horas. Os modelos foram avaliados com base nos coeficientes de determinação (R^2), de concordância (D) e angular de uma equação do tipo $Y = aX$. A CEw foi estimada para todo o perfil do solo por meio do modelo de VOGELER et al., (1996), visto que esse foi o modelo que melhor relacionou as variáveis θ , CEa e CEw. Conclui-se que os modelos estimaram bem a CEw, a partir de θ e CEa, obtidos por meio da técnica da TDR, em condições de campo, sendo que, os modelos de RHOADES et al., (1976) e VOGELER et al., (1996) foram os melhores; a técnica da TDR é capaz de monitorar a variação espacial e temporal de θ , em condições de campo, mas, essa capacidade se reduz com o aumento da salinidade do solo, implicando

em redução da qualidade dos dados por ela obtidos; e a técnica da TDR apresentou limitação no monitoramento da variação espacial e temporal de CEa e CEw, em condições de campo, principalmente no solo da trincheira, na qual, o bananal foi adubado com 1.008 kg ha⁻¹ por ano de K₂O.

Palavras-chave: TDR, manejo de fertirrigação, salinidade do solo

MONITORING THE WATER CONTENT AND BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL SOLUTION

Abstract: This work had as objective to evaluate six models, concerning its capability of estimating the electrical conductivity of soil solution (ECw) from data of soil water content (θ) and bulk electrical conductivity (ECa), obtained by means of TDR technique, as well to evaluate the feasibility of using TDR technique for monitoring time and space variation of θ , ECa and ECw, under field conditions. During eight days, readings of θ and ECa were performed in a 15-minute intervals, in 22 locations of the soil profiles cropped with banana plant under potassium fertirrigation. ECw was monitored at six from those 22 locations in the profile by solution extractors. The solution samples were collected 45 minutes before and after each fertirrigation event and following at each 24 hours. The evaluation of models concerning their capability of relate θ , ECa and ECw was accomplished based upon the agreement coefficient of concordance (D) proposed by WILLMONTT (1981), the goodness of fit (R^2) and based upon the angular coefficient of the linear equation $Y = aX$. After have fitted the models to data of θ , ECa and ECw and have determined the model parameters, CEw was estimated for the best model (VOGELER et al., 1996) in the whole profile monitored with the TDR (22 locations). The models estimated reasonably CEw from θ and ECa obtained by TDR technique under field conditions, as distinguishing the models by RHOADES et al. (1976) and VOGELER et al. (1996); the TDR technique is able to monitor the space and time variation of θ under field conditions, although its capability decrease as the soil salinity increase; the TDR technique showed limitation in the monitoring of

spatial and temporal variation of EC_a and EC_w, under field conditions, mainly in case higher amount of K₂O applied (1,008 kg ha⁻¹).

Key words: TDR, fertirrigation management, soil of the salinity

INTRODUÇÃO

O uso da fertirrigação tem crescido substancialmente nos últimos anos, sobretudo em condições de irrigação localizada. Com a expansão do uso desta tecnologia, a demanda por informações para o seu manejo adequado tem aumentado consideravelmente. Não obstante, tais informações ainda são escassas (FOLEGATTI, 1999).

Informações sobre variação espacial e temporal do teor de água (θ), da condutividade elétrica aparente (CE_a) e da condutividade elétrica da solução do solo (CE_w) são de suma importância na descrição do movimento de água e íons no solo (VOGELER et al., 1996), na modelagem do bulbo molhado (SOUZA, 2002) e da dinâmica de água e solutos na zona radicular (MMOLAWA & OR, 2000), na identificação de perfis de extração de água pelo sistema radicular das culturas (COELHO & OR, 1996), na estimativa da evapotranspiração das culturas (WARD & DUNIN, 2001) e no manejo de fertirrigação. A implementação de um método capaz de monitorar a distribuição de água e solutos iônicos (e.g., sais fertilizantes) no solo faz-se necessária para facilitar o manejo intensivo dos solos submetidos à exploração agrícola (WRAITH & DAS, 1998).

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tem sido aceita como uma ferramenta razoável na determinação de θ , atribuindo-se a ela, inúmeras vantagens em relação a outros métodos de monitoramento de θ , tais como, rapidez na obtenção de resultados, possibilidade de automação e

multiplexação e, por conseguinte, de monitoramento de θ em diversas posições do solo, com o uso de um único equipamento de TDR (WRAITH & DAS, 1998).

Sabe-se, entretanto, que a técnica da TDR não se limita à determinação de θ , pois determina, também, simultaneamente, a CEa e, de forma indireta, possibilita determinar a CEw, por meio de modelos disponíveis na literatura (RHOADES et al., 1976; RHOADES et al., 1989; NADLER et al., 1984, modificado por RHOADES et al., 1989; MUALEN & FRIEDMAN, 1991; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996). A aplicação dessa técnica no monitoramento do transporte de elementos químicos no solo foi demonstrada por KACHANOSKI et al., (1992) e WRAITH et al., (1993). Dessa forma, verifica-se a possibilidade de se monitorar continuamente a variação espacial e temporal de θ , CEa e CEw nos solos cultivados, a fim de subsidiar o manejo de fertirrigação.

Objetivou-se, neste trabalho, avaliar seis modelos que relacionam θ , CEa e CEw, quanto à sua capacidade de estimar a CEw, a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR, e a viabilidade de uso dessa técnica no monitoramento da variação espacial e temporal de CEa, θ e CEw, em condições de campo.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Fazenda Experimental do Gortuba (FEGR), vinculada ao Centro Tecnológico do Norte de Minas Gerais (CTNM), pertencente à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), em Nova Porteirinha, MG, em um plantio de bananeira, cultivar Prata-Anã, no sexto ciclo de produção, com espaçamento 3,0 m x 2,7 m x 2,7 m (Figura 1). O solo da área experimental apresenta as seguintes características físico-

hídricas: areia total 427,3 g kg⁻¹, silte 417,3 g kg⁻¹, argila 155,3 g kg⁻¹, densidade do solo 1,46 g cm⁻³ e teores de água no solo correspondentes a -10 e -1.500 kPa iguais, respectivamente, a 0,2155 e 0,1572 kg kg⁻¹. As características químicas do solo da área experimental na qual se realizou o trabalho são apresentadas na Tabela 1.

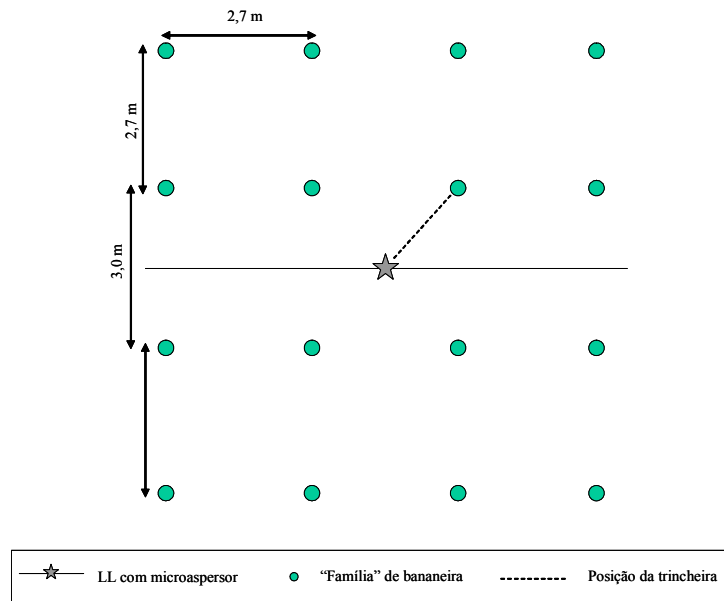


Figura 1. Linhas de plantio de bananeira, linha lateral (LL) de irrigação com microaspersor e posição da trincheira, em relação à família de bananeira e ao microaspersor.

Tabela 1. Características químicas do solo da área experimental, para as duas doses de K₂O aplicadas e para três profundidades

Dose de K ₂ O	Prof.	pH	P	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+Al	SB	T	V
kg ha ⁻¹ por ano	cm	em água	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³								%
432	0-20	5,6	23,8	118	3,7	1,4	5,1	0,0	0,0	2,1	5,4	7,5	72
432	20-40	6,0	11,1	43	5,3	1,8	7,1	0,0	0,0	1,7	7,2	8,9	81
432	40-60	6,2	3,1	31	7,9	2,7	10,6	0,0	0,0	1,9	10,7	12,6	85
1.008	0-20	5,4	35,7	128	3,7	1,3	5,0	0,0	0,0	2,1	5,4	7,5	72
1.008	20-40	5,8	9,3	50	4,4	1,5	5,9	0,0	0,0	1,3	6,1	7,4	82
1.008	40-60	5,9	7,6	45	3,8	1,4	5,2	0,0	0,0	0,5	5,4	5,9	92

O bananal foi fertirrigado por um sistema de microaspersão. Os emissores tinham vazão igual a 60 L h^{-1} e raio de alcance de 3,0 m, operando com pressão de 160 kPa,. Cada microaspersor irrigava quatro “famílias” de bananeira, posicionado no centro da área compreendida entre as quatro “famílias” irrigadas (Figura 1). As irrigações foram manejadas com base no método do tanque classe A, sendo realizadas durante quatro dias da semana (de terça-feira a sexta-feira), em razão da falta de água nos canais durante os demais dias da semana, ao passo que, a fertirrigação tinha frequência semanal. Utilizou-se um Venturi como injetor da solução de água e fertilizantes.

Duas trincheiras foram abertas na direção diagonal, em relação às linhas de plantio, partindo-se da planta para o microaspersor (Figura 1), para monitorar a variação espacial e temporal de CEa, θ e CEw, em condições de campo, por meio da TDR.

Os aparelhos utilizados no monitoramento do teor de água (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa) constituíram-se de um TDR, um datalogger, uma bateria, uma placa fotovoltaica, quatro caixas multiplexadoras (contendo cada uma oito canais) e 22 sondas de TDR por trincheira avaliada. Para monitorar a condutividade elétrica da solução do solo (CEw) utilizou-se extratores de solução do solo.

As sondas de TDR foram construídas de acordo com COELHO et al., (2005) e testadas quanto à homogeneidade, mergulhando-as numa pasta de solo e água, na proporção de 2:1 e fazendo-se leituras de θ e CEa. Foram selecionadas aquelas com dispersão inferior a 10% em relação à média dos valores de θ e CEa lidos.

As sondas de TDR e os extratores de solução do solo foram instalados nas posições indicadas na Figura 2. As sondas de TDR foram instaladas no sentido horizontal, em solo firme, ou seja, em uma das paredes das trincheiras. Após a instalação das sondas, as duas trincheiras, nas quais se monitorou θ , CEa e CEw, foram preenchidas com solo e mantidas em repouso por um período de 60 dias.

Em uma das duas trincheiras, nas quais se monitorou a CEa, θ e CEw, o bananal foi adubado com 432 kg ha^{-1} de K_2O por ano e na outra trincheira, adubado com 1.008 kg ha^{-1} de K_2O por ano; em ambos os casos, o fertilizante

utilizado como fonte de potássio foi o cloreto de potássio (KCl). A fim de eliminar o efeito da salinidade de outros fertilizantes nas variáveis monitoradas, 45 dias antes do início da coleta de dados, suspenderam-se as demais adubações.

Em cada trincheira, efetuaram-se leituras de θ , CEa e CEw durante oito dias, cobrindo dois eventos de fertirrigação. As leituras de θ e CEa foram feitas a cada 15 minutos, sendo seus valores armazenados pelo datalogger. A solução do solo foi coletada nos seguintes momentos: 45 minutos antes e 45 minutos após cada evento de fertirrigação e, a partir daí, em intervalos de 24 horas, até 24 horas após o segundo evento de fertirrigação.

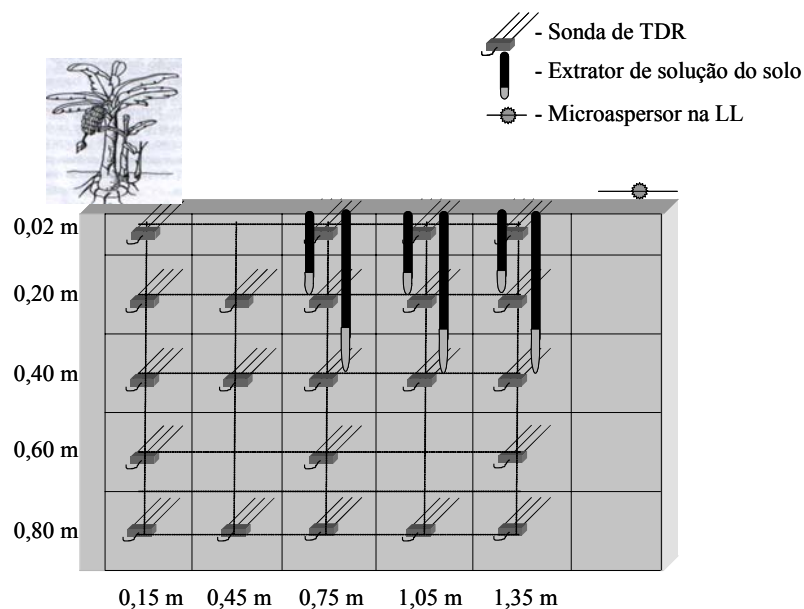


Figura 2. Perfil representativo da vista lateral das trincheiras, contendo as posições em que as sondas de TDR e extratores de solução do solo foram instalados.

O teor de água no solo (θ) foi determinado por meio da equação de LEDIEU et al. (1986) (Equação 1). Posteriormente, calculou-se a constante dielétrica do solo (ϵ_b), com o uso da Equação 1 e substituíram-se seus valores em uma das Equações 2a ou 2b, conforme o caso, que são as equações de calibração da TDR para leitura de θ , para o solo da área na qual realizou-se o experimento.

$$\theta = 0,1138 \sqrt{\varepsilon_b} - 0,1758 \quad (1)$$

$$\theta = -0,1722 + 0,0350 \varepsilon_b - 0,0013 \varepsilon_b^2 + 2,0 \cdot 10^{-5} \varepsilon_b^3 \quad \text{para a CT}_{fa} \quad (2a)$$

$$\theta = -0,1309 + 0,0250 \varepsilon_b - 0,0006 \varepsilon_b^2 + 9,0 \cdot 10^{-6} \varepsilon_b^3 \quad \text{para a CT}_f \quad (2b)$$

Em que, θ corresponde ao teor de água no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, ε_b à constante dielétrica do solo, CT_{fa} à classe textural franco-arenosa e CT_f à classe textural franca.

A CEa foi determinada por meio da equação de GIESE & TIEMANN (1975) (Equação 3). Posteriormente, os valores de CEa foram multiplicados pelos valores do fator de correção de condutividade elétrica quanto aos efeitos da temperatura (f_T), que foi calculado com a Equação 4 (FRANSON, 1985).

$$\text{CEa} = \frac{Z_0}{120 \pi L Z_u} \left(\frac{2 V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (3)$$

em que,

CEa = é a condutividade elétrica aparente do solo, em dS m^{-1} ;

L = é o comprimento da sonda, m;

Z_0 = é a impedância característica da sonda, obtida em água destilada, conforme SOUZA et. al., (2004);

Z_u = é a impedância no cabo $\sim 50 \Omega$;

V_0 = é a amplitude do sinal eletromagnético gerado pelo TDR;

V_{inf} = é a amplitude do sinal eletromagnético após a reflexão no início da sonda.

$$f_T = \frac{1}{[1 + \alpha (T - 25)]} \quad (4)$$

em que,

f_T = é o fator de correção da CEa quanto ao efeito da temperatura, adimensional;

α = é o coeficiente de temperatura e é igual a $0,019 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, conforme HEIMOVAARA et al., (1995); e

T = é a temperatura da solução do solo, em $^\circ\text{C}$.

A CEw foi determinada por meio de um condutímetro de mesa.

Seis modelos que relacionam as variáveis θ , CEa e CEw foram avaliados, quanto à sua capacidade de estimar a condutividade elétrica da solução do solo (CEw), a partir de θ e CEa (Tabela 2). Os dados de θ e CEa correspondentes aos momentos e posições do perfil do solo, nos quais, extraiu-se solução do solo, foram, juntamente com os dados de CEw, processados por meio de planilha eletrônica, visando a obtenção dos valores dos parâmetros dos modelos que otimizam a relação existente entre as variáveis θ , CEa e CEw.

Tabela 2. Modelos utilizados para se estimar a condutividade elétrica da solução do solo (CEw)¹, na sua forma original

AUTOR	MODELO	Parâmetros ²	Equação nº
RHOADES et al. (1976)	$CEa = (a \theta^2 + b \theta)CEw + CE_s$	a, b, CE_s^3	(5)
VOGELER et al., (1996)	$CEa = (c \theta - d)CEw + (a \theta - b)$	a, b, c, d	(6)
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	$CEa = CEw \left(\frac{\theta^\beta}{\theta_s} \right) + CE_s$	β , CE_s^3	(7)
RHOADES et al. (1989)	$CEa = [\theta - (c \theta + d)]CEw + \frac{(\theta_{sol} + c \theta + d)^2}{\theta_{sol}}$	c, d	(8)
HEIMOVAARA et al. (1995)	$CEa = CEw (\theta - \theta_r)^{\beta+1} \frac{\left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2}{1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{q}} \right)^q}$	n, p, β	(9)
NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989) ⁴	$CEw = f_T (CE_a - \delta CE_s) F(\theta)$	CE_s^3 , ϕ_s , θ_{ws}	(10)

¹ sendo, CEa, CEw e CE_s , em dS m^{-1} e θ , θ_s e θ_r em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Para o modelo de NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989), CEa, CEw e CE_s devem estar em S m^{-1} ;

² Obtidos por otimização, por meio do método dos mínimos quadrados;

³ CE_s corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada com as trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada como uma constante para cada solo; e

⁴ Esse modelo já apresenta na sua estrutura o fator de correção da CE quanto aos efeitos da temperatura (f_T).

A fração volumétrica do solo ocupada por solutos (θ_{sol}) foi obtida por meio da Equação 11.

$$\theta_{sol} = \frac{Ds}{Dp} \quad (11)$$

em que, Ds e Dp correspondem, respectivamente, à densidade do solo e de partículas e são expressas em $kg\ dm^{-3}$.

O índice de saturação (Θ) foi calculado por meio da Equação 12.

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (12)$$

em que, θ_r e θ_s correspondem, respectivamente, às teores de água no solo residual e de saturação, em $cm^3\ cm^{-3}$.

O teor de água residual no solo (θ_r) foi obtido pelo método gravimétrico padrão de estufa e, o correspondente à saturação (θ_s) foi obtido conforme a Equação 13:

$$\theta_s = 1 - \left(\frac{Ds}{Dp} \right) \quad (13)$$

O parâmetro empírico (δ) e o fator $F(\theta)$, que prevê o efeito da tortuosidade dos poros do solo sobre o fluxo de corrente elétrica no meio poroso, foram obtidos por meio das Equações 14 e 15, respectivamente, válidas para $0,2 < CEws < 0,4\ S\ m^{-1}$ e $CEs < 0,15\ S\ m^{-1}$ (RHOADES et al., 1989). $CEws$ corresponde à condutividade elétrica da água higroscópica do solo.

$$\delta = \frac{(\phi_s + \theta_{ws})^2}{\phi_s} \quad (14)$$

$$F(\theta) = \frac{1}{(\theta - \theta_{ws})} \quad (15)$$

em que, ϕ_s corresponde ao conteúdo volumétrico da fração sólida do solo ($m^3 m^{-3}$) e θ_{ws} à água higroscópica do solo ($m^3 m^{-3}$).

Os parâmetros empíricos m e q foram calculados por meio das Equações 16 e 17, respectivamente (HEIMOVAARA et al., 1995).

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n} \right) \quad (16)$$

$$q = 1 - \left(\frac{2}{p} \right) \quad (17)$$

Os ajustes dos modelos utilizados para se estimar a condutividade elétrica da solução do solo (Tabela 2), foram otimizados explicitando-se a variável CEw (Tabela 3).

A avaliação dos modelos quanto à sua capacidade de relacionar θ , CEa e CEw, com vistas à estimativa da CEw a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da técnica da TDR, foi realizada com base no coeficiente de concordância (D), proposto por WILLMONTT (1981) (Equação 24), no coeficiente de determinação (R^2) e no grau de ajuste da variável dependente (Y) com a variável independente (X), mediante o estabelecimento de uma equação do tipo $Y = aX$, após otimização de seus ajustes aos dados medidos, por meio de planilha eletrônica.

Tabela 3. Modelos utilizados para se estimar a condutividade elétrica da solução do solo (CEw)¹, tendo a variável CEw explicitada

AUTOR	MODELO	Parâmetros ²	Equação n ^o
RHOADES et al. (1976)	$CE_w = \frac{(CE_a - CE_s)}{(a \theta^2 + b \theta)}$	a, b, CE _s ³	(18)
VOGELER et al. (1996)	$CE_w = \frac{[CE_a - (a \theta - b)]}{(c \theta - d)}$	a, b, c, d	(19)
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	$CE_w = \frac{(CE_a - CE_s) \theta_s}{\theta^\beta}$	β, CE _s ³	(20)
RHOADES et al. (1989)	$CE_w = \frac{CE_a - \frac{(\theta_{sol} + c \theta + d)^2}{\theta_{sol}}}{[\theta - (c \theta + d)]}$	c, d	(21)
HEIMOVAARA et al. (1995)	$CE_w = \frac{CE_a \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/4} \right)^q \right]}{(\theta - \theta_r)^{\beta+1} \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/m} \right)^m \right]^2}$	n, p, β	(22)
NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989) ⁴	$CE_w = f_T (CE_a - \delta CE_s) F(\theta)$	CE _s ³ , φ _s , θ _{ws}	(23)

¹ sendo, CE_a, CE_w e CE_s, em dS m⁻¹ e θ, θ_s e θ_r em cm³ cm⁻³. Para o modelo de NADLER et al. (1984), mod. por RHOADES et al. (1989), CE_a, CE_w e CE_s devem estar em S m⁻¹;

² Obtidos por otimização, com base no método dos mínimos quadrados;

³ CE_s corresponde à condutividade elétrica da fração sólida do solo. Está associada com as trocas iônicas na interface sólido-líquido do solo e normalmente é considerada como uma constante para cada solo; e

⁴ Esse modelo já apresenta na sua estrutura o fator de correção da CE quanto aos efeitos da temperatura (f_T).

$$D = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}| + |E_i - \bar{M}|)^2} \right] \quad (24)$$

em que,

M_i = é o valor medido de ordem i;

E_i = é o valor estimado de ordem i;

\bar{M} = é a média dos valores medidos; e

n = é o número de valores medidos.

O coeficiente de concordância (D) expressa a exatidão dos valores estimados em relação aos valores medidos, variando de zero, que indica nulidade, a um que indica perfeita exatidão.

Após o ajuste dos modelos aos dados de θ , CEa e CEw e, por conseguinte, obtidos os valores dos parâmetros desses modelos, procedeu-se, com o modelo que melhor ajustou as variáveis θ , CEa e CEw, a uma estimativa da CEw para todo o perfil do solo monitorado com a TDR (22 posições, conforme figura 2). Em seguida, perfis de θ , CEa e CEw foram feitos com valores de θ e CEa obtidos com a TDR e de CEw estimados. Tais perfis foram feitos para os seguintes momentos: três horas antes e três horas após cada evento de fertirrigação e, a partir daí, em intervalos de 24 horas, até 24 horas após o segundo evento de fertirrigação, para as duas doses de K_2O .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados na Tabela 4, o coeficiente de concordância (D), os valores dos parâmetros e o coeficiente de determinação (R^2) dos seis modelos utilizados para estimar a condutividade elétrica da solução do solo (CEw) a partir de dados de teor de água (θ) e condutividade elétrica aparente do solo (CEa), referentes às trincheiras sob aplicações de 432 e 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano.

Quanto ao coeficiente de determinação (R^2), percebe-se que os seis modelos estimaram bem a CEw (R^2 médio igual a 0,9324 e 0,7546, para os dados de θ e CEa obtidos, respectivamente, nas trincheiras sob aplicações de 432 e 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano). Estes ajustes podem ser considerados bons, uma vez se tratando de relações de variáveis, a partir de dados obtidos em condições de campo. Assim como em diversos outros trabalhos (MUÑOZ-CARPENA et al., 2001; WRAITH & DAS, 1998), os modelos de RHOADES et al., (1976) e de VOGELER et al., (1996), também sobressaíram perante aos demais modelos avaliados, (R^2 em torno de 0,96 e 0,90, para os dados de θ e CEa obtidos, respectivamente, nas trincheiras sob aplicações de 432 e 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano). Quanto ao R^2 , cabe ressalva apenas, para os casos dos modelos de MUALEN & FRIEDMAN (1991), RHOADES et al., (1989) e NADLER et al., (1984), modificado por RHOADES et al., (1989) que proporcionaram R^2 inferiores a 0,70; mas, mesmo assim, em se tratando de ajustes de modelos, a partir de dados obtidos em condições de campo, esses ajustes não devem ser desprezados.

Tabela 4. Coeficiente de concordância (D), parâmetros e coeficientes de determinação (R^2) dos seis modelos utilizados para estimar a CEw a partir de dados de θ e CEa, referentes às trincheiras sob aplicações de 432 e 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano

Dose de K ₂ O igual a 432 kg ha ⁻¹ por ano												
MODELO / AUTOR	D	Parâmetros										R ²
		a	b	c	d	CEs ¹	β	n	p	ϕ_s	θ_{ws}	
RHOADES et al. (1976)	0,9979	5,6763	-0,4287	-	-	0,1610	-	-	-	-	-	0,9615
VOGELER et al. (1996)	0,9981	-1,1510	-0,4832	4,6826	1,0067	-	-	-	-	-	-	0,9653
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	0,9967	-	-	-	-	0,1500	1,7289	-	-	-	-	0,9332
RHOADES et al. (1989)	0,9962	-	-	-0,4887	-0,0076	-	-	-	-	-	-	0,9318
HEIMOVAARA et al. (1995)	0,9553	-	-	-	-	-	-0,5881	-0,2416	1,001	-	-	0,8648
NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989)	0,9966	-	-	-	-	0,1723	-	-	-	0,9993	-0,1227	0,9381
Dose de K ₂ O igual a 1.008 kg ha ⁻¹ por ano												
RHOADES et al. (1976)	0,9991	-0,9708	0,7857	-	-	0,4343	-	-	-	-	-	0,8940
VOGELER et al. (1996)	0,9767	-4,7060	-1,5362	0,9247	0,0259	-	-	-	-	-	-	0,9174
MUALEN & FRIEDMAN (1991)	0,9993	-	-	-	-	0,7289	3,5793	-	-	-	-	0,6106
RHOADES et al. (1989)	0,9998	-	-	0,6549	-0,0549	-	-	-	-	-	-	0,6712
HEIMOVAARA et al. (1995)	0,9973	-	-	-	-	-	0,0021	0,2367	1,001	-	-	0,8834
NADLER et al. (1984), modificado por RHOADES et al. (1989)	0,9998	-	-	-	-	0,4490	-	-	-	0,9969	0,2664	0,5513

¹CEs expressa em dS m⁻¹.

Com relação aos parâmetros dos modelos, merece menção a semelhança entre os valores da condutividade elétrica da superfície das partículas (CEs) estimados pelos modelos que a detém em sua estrutura (RHOADES et al., 1976; MUALEN & FRIEDMAN, 1991 e NADLER et al., (1984) modificado por RHOADES et al., 1989), na dose de K_2O igual a 432 kg ha^{-1} por ano (CEs iguais a 0,1610; 0,1500 e 0,1723, respectivamente) e na dose de K_2O igual a 1.008 kg ha^{-1} por ano (CEs iguais a 0,4343; 0,7289 e 0,4490, respectivamente). Exceção é feita para o modelo de MUALEN & FRIEDMAN (1991), para o qual o valor da CEs divergiu sensivelmente em comparação aos valores obtidos com os demais modelos.

No que tange ao coeficiente de concordância (D), nota-se que este foi superior a 0,99, indicando elevado grau de ajuste da CEw estimada com a CEw medida, exceto para os modelos de HEIMOVAARA et al., (1995), na dose de K_2O igual a 432 kg ha^{-1} por ano (D igual a 0,9553), e de VOGELER et al., (1996), na dose de K_2O igual a 1.008 kg ha^{-1} por ano, (D igual a 0,9767). Esses valores de D reforçam e dão mais solidez ao que se observou nos valores de R^2 .

A sistemática superioridade dos modelos de RHOADES et al., (1976) e de VOGELER et al., (1996) frente aos demais, nesse e em outros trabalhos, nos diversos solos e classes texturais de solo, os coloca em vantagem no quesito estimativa da CEw a partir de dados de θ e CEa obtidos por meio da TDR.

Tanto com base nos valores de R^2 , quanto nos valores de D, verificou-se notável superioridade dos ajustes dos modelos aos dados de θ e CEa obtidos na trincheira sob aplicação de 432 kg ha^{-1} de K_2O por ano, comparativamente, àqueles obtidos com a dose de 1.008 kg ha^{-1} por ano. Sabe-se, entretanto, que a capacidade de leitura de θ e CEa pela TDR, é tanto maior quanto menor for a salinidade do solo, visto que esta interfere na conformação da linha de reflexão do pulso eletromagnético da TDR. Essa interferência se dá por meio da deformação dessa linha com o aumento da salinidade do solo (MUÑOZ-CARPENA et al., 2001). Disso, fica implícito que a TDR só tem capacidade de determinar θ e CEa até um determinado valor de salinidade do solo e que a qualidade dos valores de θ e CEa determinados pela TDR decresce com o

aumento desta salinidade. COELHO et al., (2005), avaliando sondas de TDR semelhantes às sondas utilizadas nesse trabalho, concluíram que o valor máximo de CEa possível de ser lido pela TDR, com esse tipo de sonda, é de 1,0 dS m⁻¹. Assim, é razoável supor que a salinidade do solo na trincheira situada na área de bananal adubado com dose de K₂O igual a 1.008 kg ha⁻¹ por ano encontra-se próximo do valor-limite (1,0 dS m⁻¹), em que a TDR é capaz de determinar, com o uso desse tipo de sonda.

Nas Figuras 3 e 4, é mostrada a CEw estimada em função da CEw medida nas trincheiras sob aplicações de doses de K₂O iguais a 432 e 1.008 kg ha⁻¹ por ano, respectivamente.

Com relação à área de bananal adubado com dose de K₂O igual a 432 kg ha⁻¹ por ano (Figura 3), verifica-se também, expressivo ajuste dos modelos aos dados de θ e CEa com vistas à predição da CEw, ao observar o coeficiente angular da equação da reta do tipo $Y = aX$. Nota-se que este variou de 0,9482 (para HEIMOVAARA et al., 1995, com R² igual a 0,9482) a 1,1200 (para MUALEN & FRIEDMAN, 1991, com R² igual a 0,9775). Excetuando-se estes extremos em que, HEIMOVAARA et al., 1995, subestima a CEw em 5,18% e MUALEN & FRIEDMAN, 1991, superestima a CEw em 12%, tem-se pelos demais modelos notável ajuste entre a CEw estimada e medida, com coeficiente angular próximo de 1,00 e R² em torno de 0,97.

Para o caso da área de bananal adubado com dose de K₂O igual a 1.008 kg ha⁻¹ por ano (Figura 4), ao observar o coeficiente angular da equação da reta do tipo $Y = aX$, não se verifica ajustes tão bons dos modelos aos dados de θ e CEa, quanto aqueles constatados para a dose de K₂O igual a 432 kg ha⁻¹ por ano. Para este caso, percebe-se que os modelos de RHOADES et al., (1976), VOGELER et al., (1996) e HEIMOVAARA et al., (1995) sobressaíram em relação aos demais (coeficiente angular próximo de 1,00 e R² em torno de 0,99), sugerindo maior capacidade desses modelos na estimativa da CEw a partir de dados de θ e CEa, em condições de salinidade do solo similares à do solo adubado com essa dose de K₂O. Por outro lado, os modelos de MUALEN & FRIEDMAN (1991), RHOADES et al., (1989) e NADLER et al., (1984) modificado por RHOADES et al., (1989) demonstraram limitações na estimativa da CEw, nessas condições de salinidade.

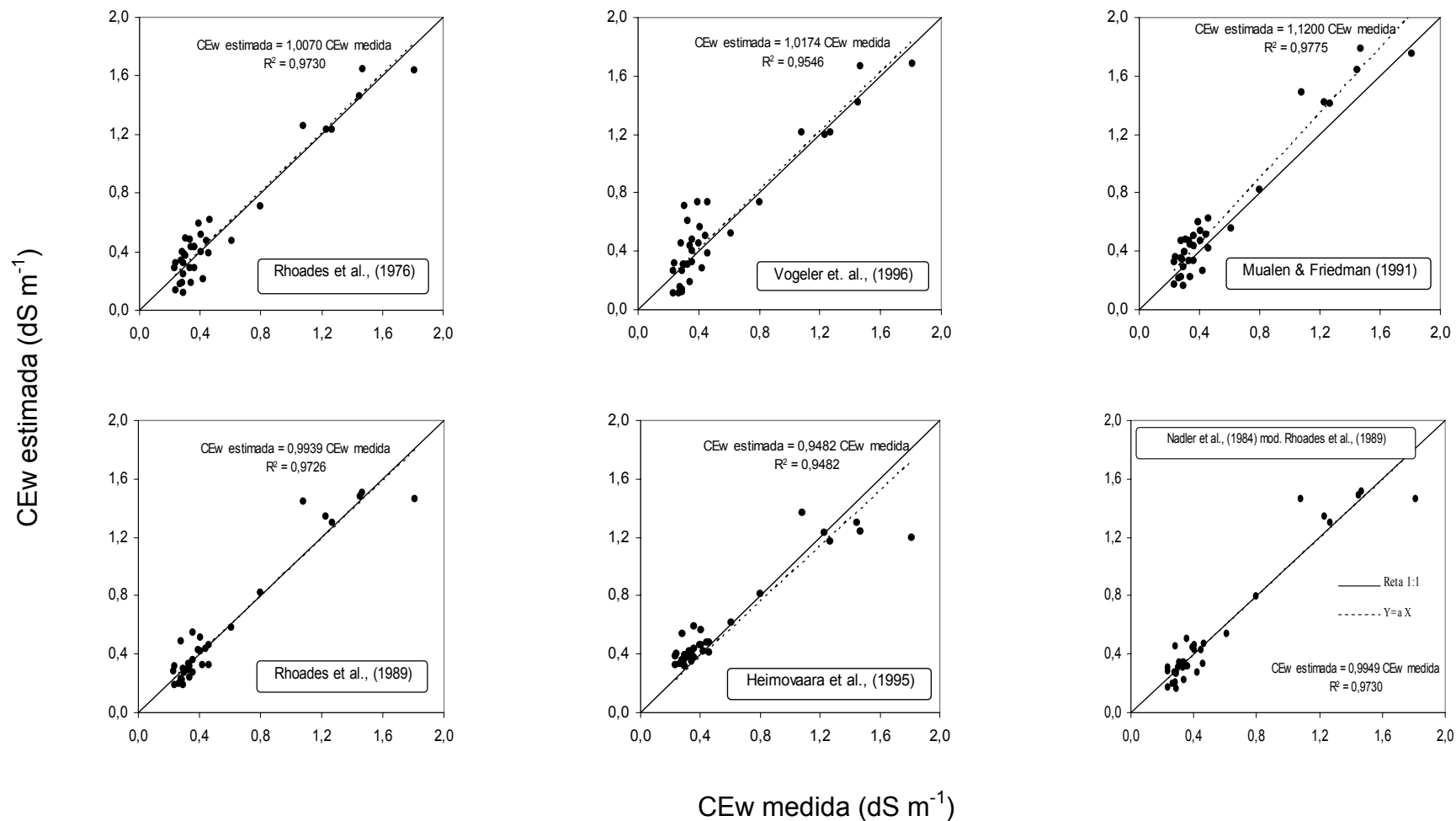


Figura 3. Relação entre a CEw medida e estimada pelos modelos que a relacionam com θ e CEa, referente à trincheira sob aplicação de 432 kg ha⁻¹ de K₂O por ano.

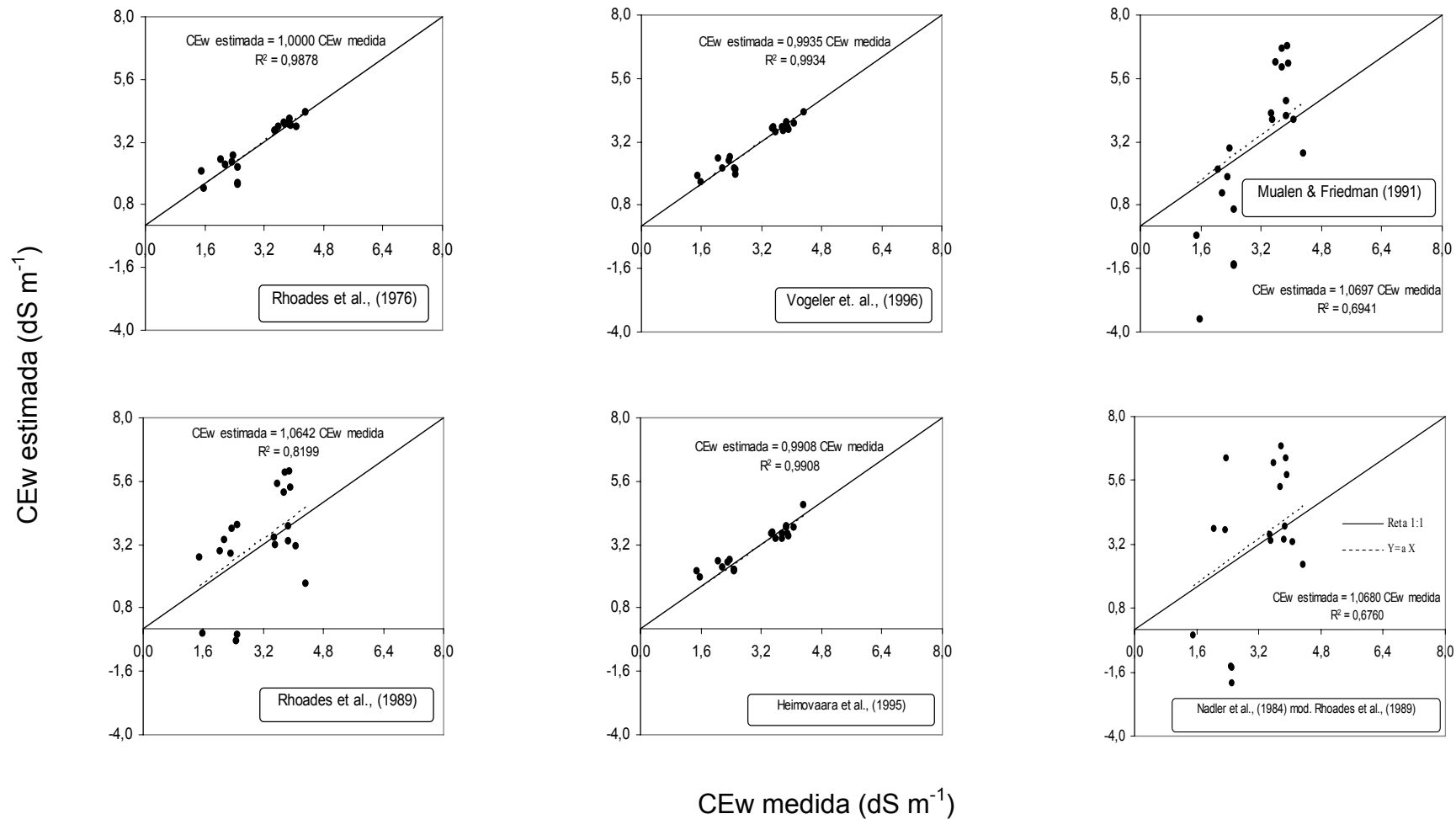


Figura 4. Relação entre a CEw medida e estimada pelos modelos que a relacionam com θ e CEa, referente à trincheira sob aplicação de 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano.

Perfis de CEa, θ e CEw referentes à trincheira sob aplicação de 432 kg ha⁻¹ de K₂O por ano são mostrados na Figura 5. Percebe-se nitidamente a variação temporal e espacial de CEa, θ e CEw.

Com relação a θ , nota-se que esta se torna cada vez menor à medida que se aproxima da superfície do solo e da “família” de bananeira (posições correspondentes às menores profundidades e aos menores raios), possivelmente devido à maior concentração de raízes (pêlos absorventes) nessas posições do solo, sugerindo que uma fração expressiva da água absorvida pela cultura da bananeira se dá nessas posições. GARCIA (2000), avaliando o efeito de sistemas de irrigação (aspersão convencional e microaspersão) sobre o sistema radicular da bananeira no Projeto Jaíba, Norte de Minas Gerais, verificou maior concentração de raízes do lado em que se encontrava o microaspersor e nos primeiros 0,30 m de profundidade (60%), para o caso de microaspersão. Outra razão provável para tal redução de θ é a maior distância do emissor de água. COELHO FILHO et al., (2004) avaliaram o perfil de distribuição de água do sistema de irrigação utilizado nesse trabalho e verificaram expressiva redução das lâminas de água precipitadas à medida que se distanciava do emissor de água.

Sabe-se que as variáveis CEa e CEw mantêm íntima relação com θ ; portanto, a análise da variação da CEa e da CEw no espaço e no tempo pode ser feita com base na variação de θ . Apesar dos perfis de CEa e CEw não apresentarem boa definição, percebe-se que estas variam de forma direta e inversa, respectivamente, com θ , comportando-se assim, de forma coerentes com o que se verifica nos modelos avaliados. Não obstante, a redução da CEw pode decorrer, também, da redução da concentração de íons salinos (nutrientes) na solução do solo, principalmente, devido a absorção destes pela cultura da bananeira.

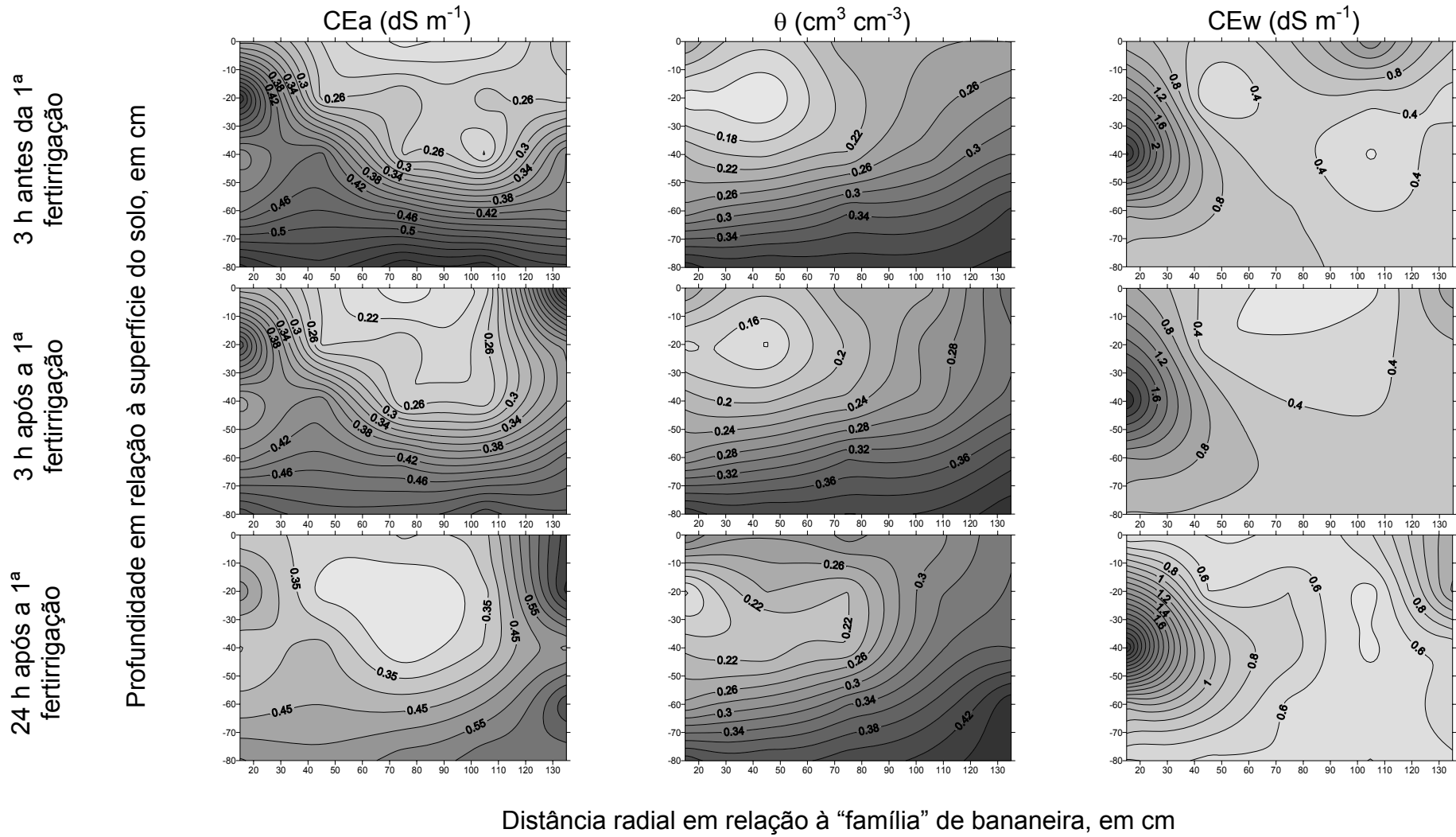


Figura 5. Perfis de CEa, θ e CEw referentes à trincheira sob aplicação de 432 kg ha^{-1} de K_2O por ano.

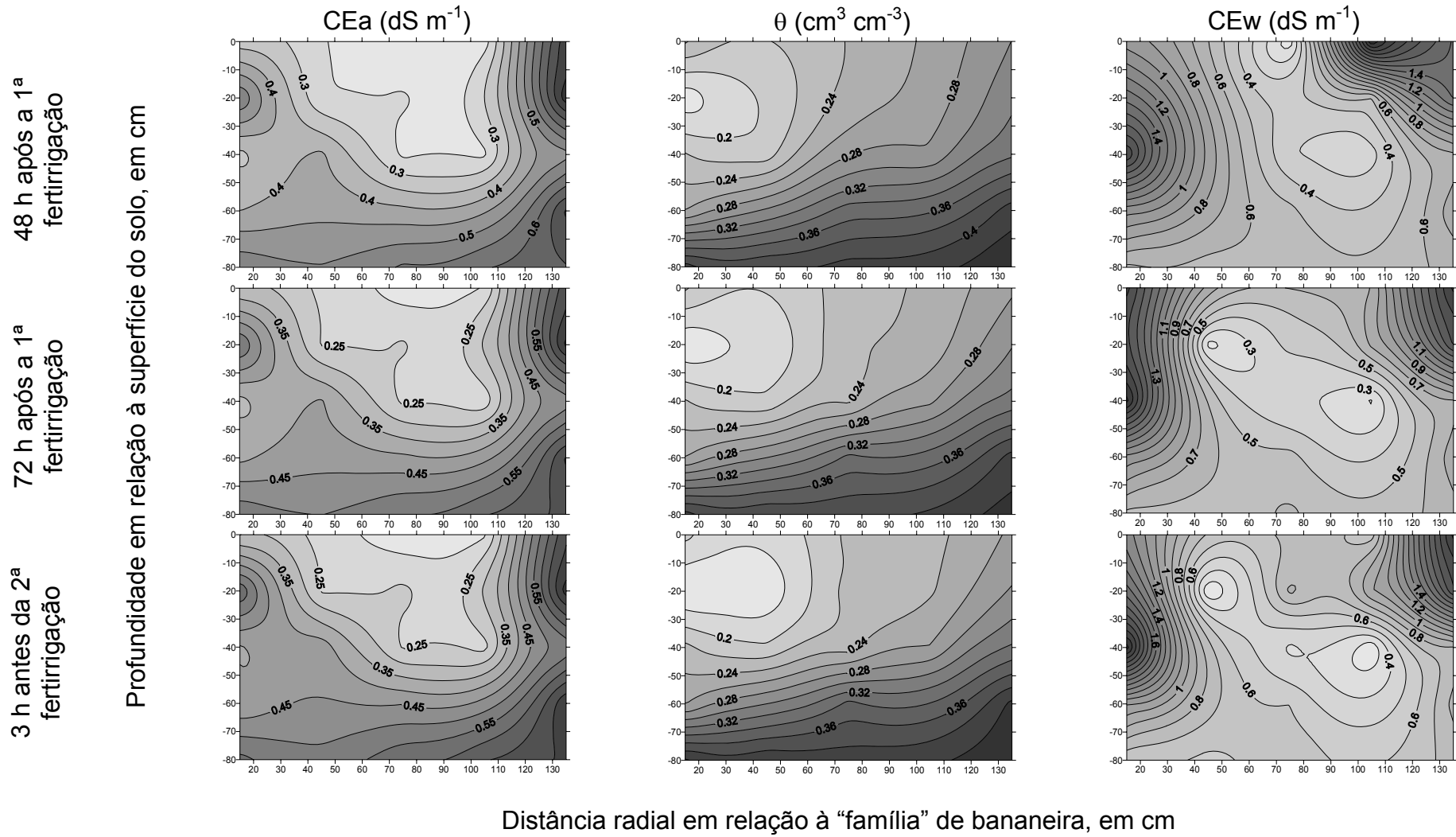
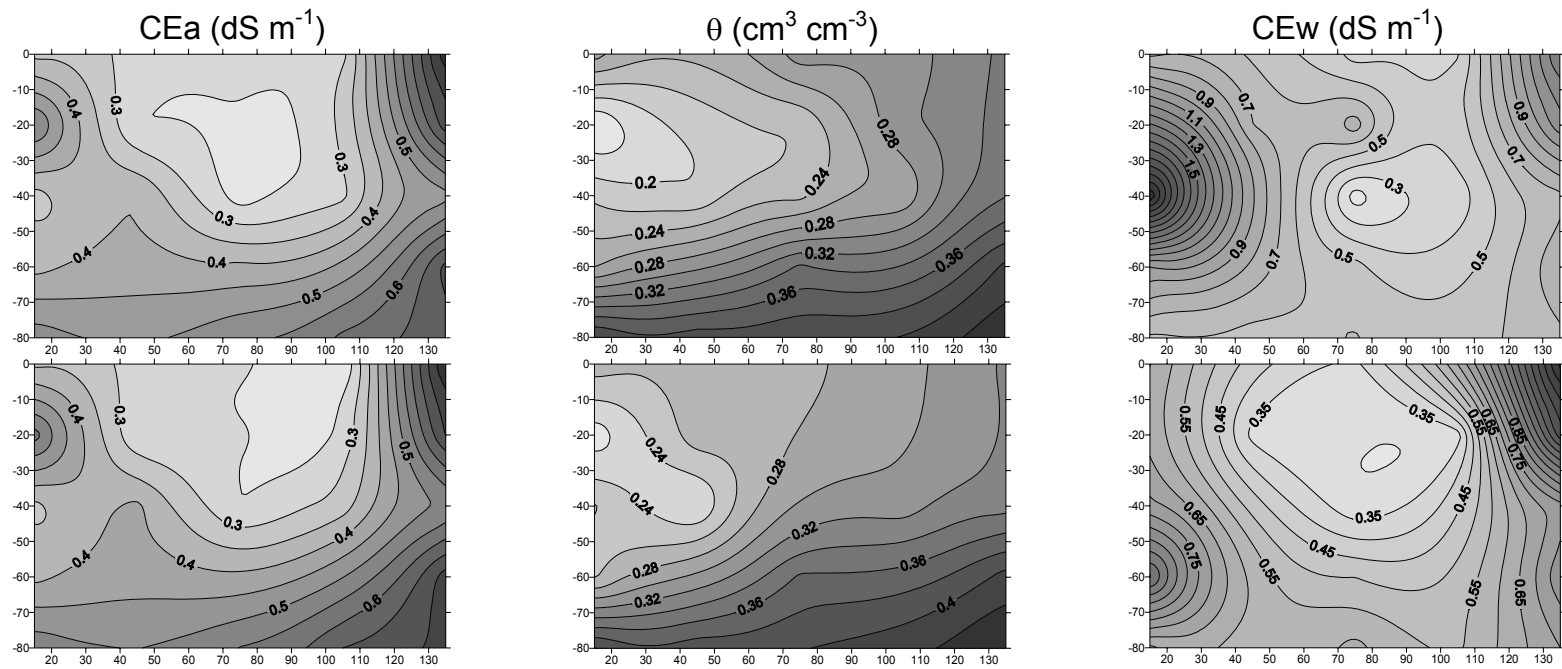


Figura 5. Continuação...

3 h após a 2^a
fertilrigação

24 h após a 2^a
fertilrigação

Profundidade em relação à superfície do
solo, em cm



Distância radial em relação à “família” de bananeira, em cm

Figura 5. Continuação...

Verifica-se também, que θ varia temporalmente, diminuindo em razão da saída de água do solo pelos processos de evapotranspiração e, ou, de percolação profunda e, aumentando em razão da ocorrência de irrigação e, ou, fertirrigação. Dessa forma, constata-se, o aumento de θ entre os momentos 3 horas antes e 3 horas após a primeira fertirrigação, em razão da entrada de água no solo por fertirrigação (primeira fertirrigação). Essa constatação pode ser confirmada tanto observando os valores de θ , quanto a inclinação das isolinhas. Aumento de θ também foi observado entre os momentos 3 e 24 horas após a primeira fertirrigação, em razão da entrada de água no solo por irrigação. Entre 24 horas após a primeira fertirrigação e 3 antes da segunda fertirrigação (95 horas após a primeira fertirrigação), tem-se constante redução de θ , em razão da não realização de irrigação e, ou, fertirrigação. O θ voltou a aumentar 3 horas após a segunda fertirrigação devido a entrada de água no solo por fertirrigação. Nota-se que, com o aumento de θ as isolinhas tendem a se tornarem perpendiculares ao eixo X (distância radial em relação à “família” de bananeira), ocorrendo o inverso à medida que θ vai se reduzindo.

Na Figura 6, perfis de CEa, θ e CEw, referentes à trincheira situada na área de bananal adubado com 1.008 kg ha^{-1} de K_2O por ano são apresentados. Percebe-se, também, redução na qualidade dos dados. Para θ , verifica-se que esta aumenta com a profundidade. Contudo, sua variação no tempo é sutil, exceto entre os momentos 3 horas antes e 3 horas após a segunda fertirrigação. Vale frisar que o aumento de θ entre os momentos 24 e 48 horas após a primeira fertirrigação deveu-se à realização de uma irrigação.

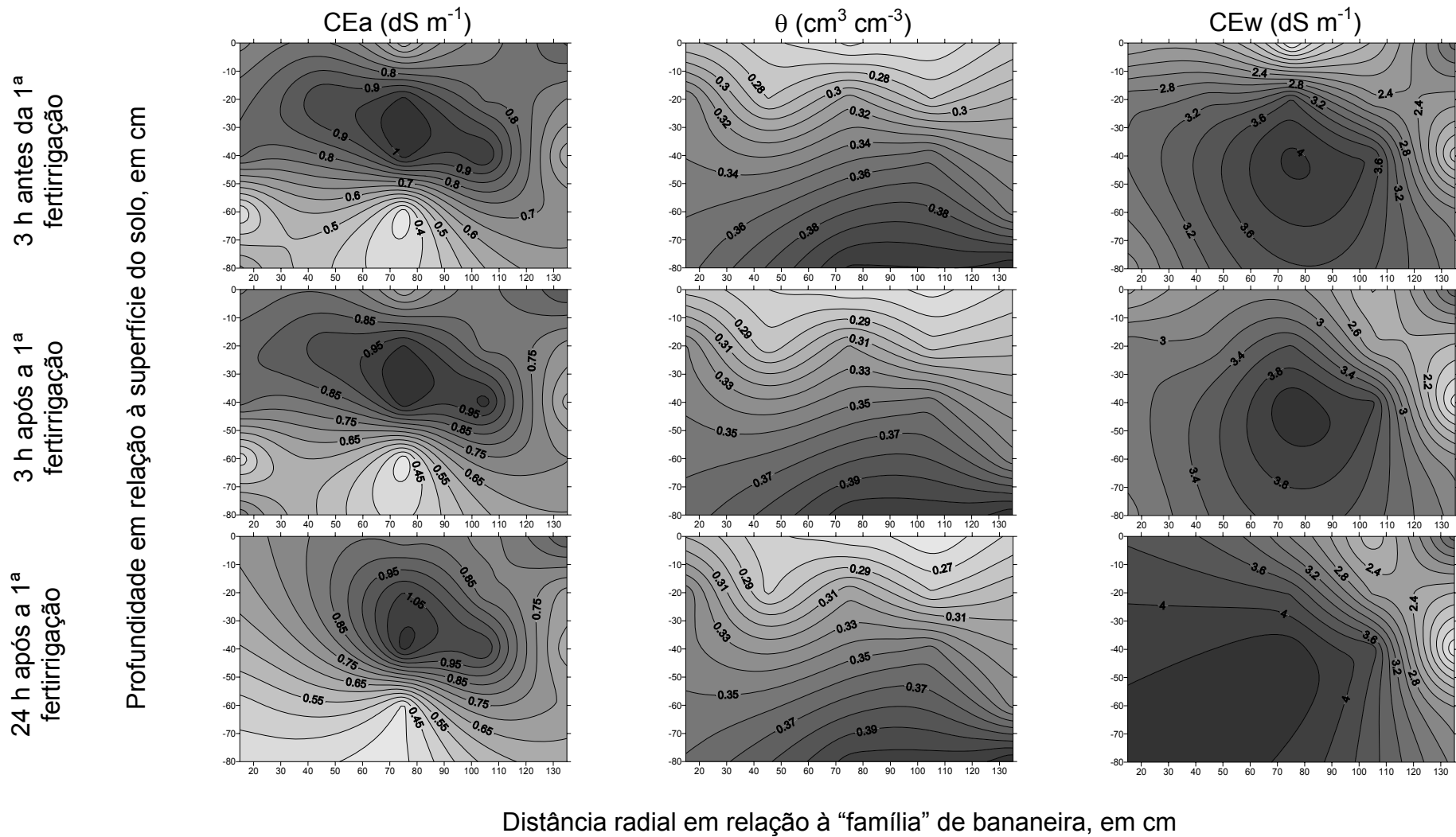


Figura 6. Perfis de CEa, θ e CEw referentes à trincheira sob aplicação de 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano.

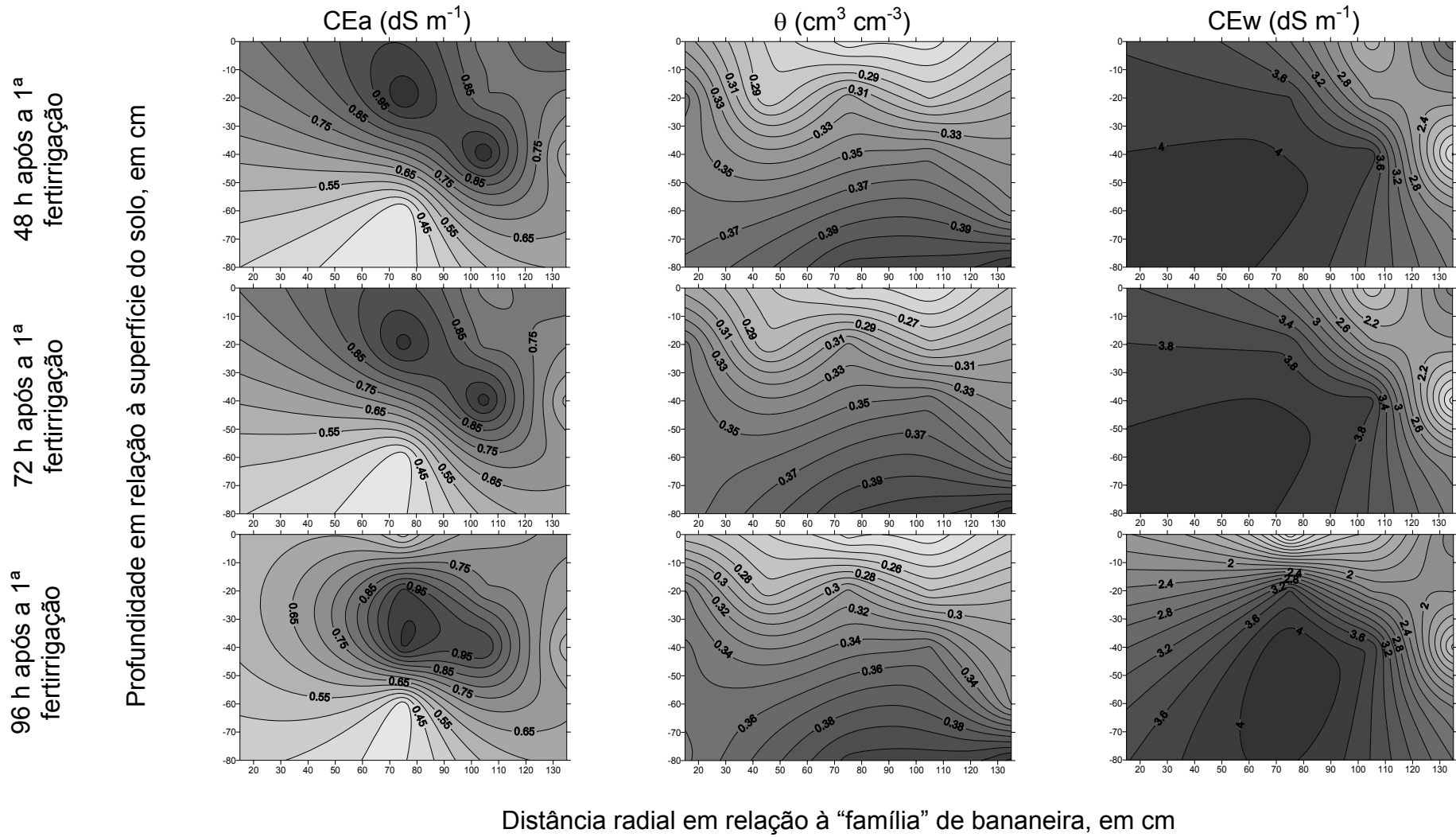
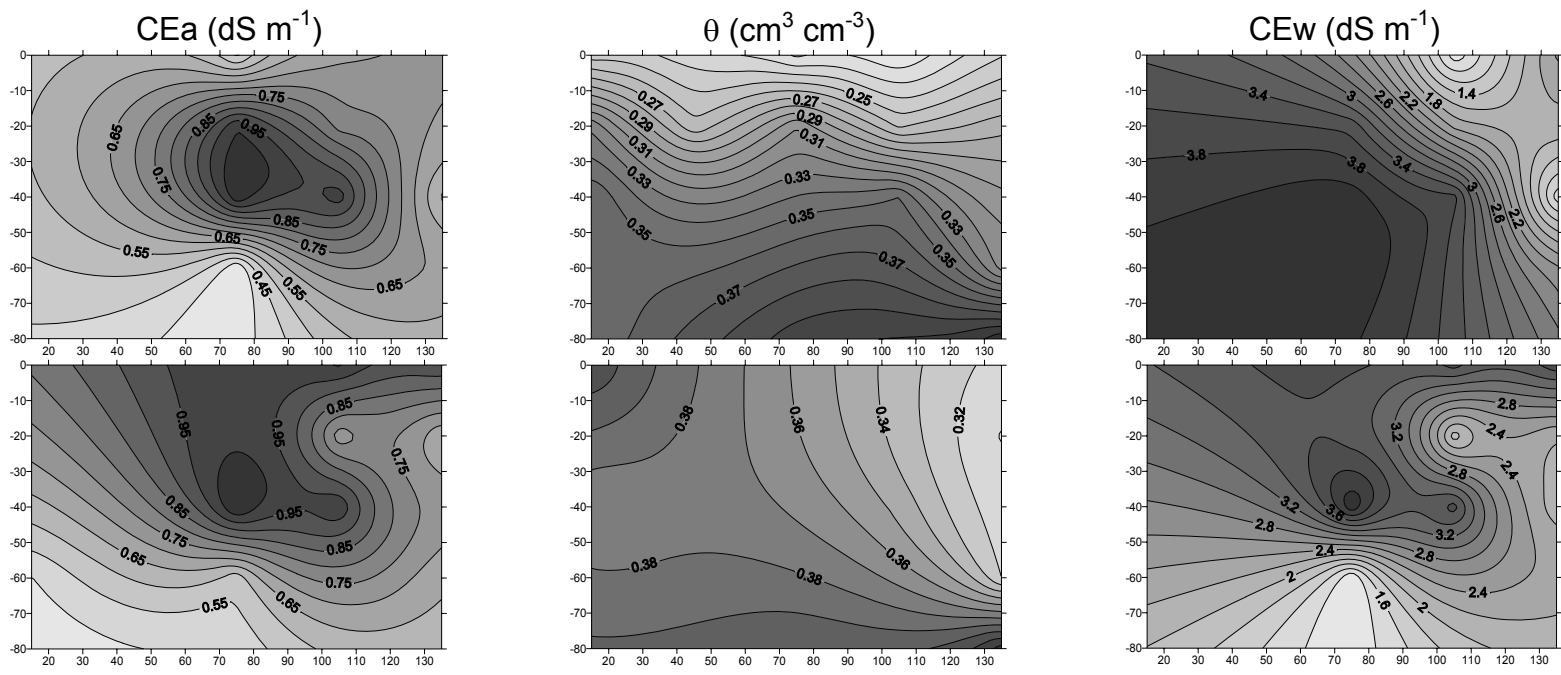


Figura 6. Continuação...

3 h antes da 2^a fertirrigação

3 h após a 2^a fertirrigação

Profundidade em relação à superfície do solo, em cm



Distância radial em relação à “família” de bananeira, em cm

Figura 6. Continuação...

Quanto à CEa e CEw, percebe-se, em seus perfis, que as variações temporal e espacial dessas não se mostram coerentes. Comparativamente aos perfis dessas variáveis apresentados na Figura 5, verifica-se redução na qualidade dos dados, possivelmente, em decorrência da maior salinidade do solo desta trincheira (Figura 6), visto que, segundo MUÑOZ-CARPENA et al. (2001), a salinidade do solo é um fator limitante para a técnica da TDR. De acordo com esses autores, a capacidade de leitura da CEa pela TDR, decresce com o aumento da salinidade, em razão da atenuação do sinal da TDR, que resulta na deformação da curva de reflexão, impossibilitando a determinação da CEa. As evidências sugerem que o valor da salinidade neste solo está próximo do valor-limite, $1,0 \text{ dS m}^{-1}$, segundo COELHO et al. (2005), em que a TDR é capaz de determinar, resultando assim em dados de qualidade ruim.

CONCLUSÕES

Os modelos avaliados estimaram bem a condutividade elétrica da solução do solo (CEw), a partir de dados de teor de água (θ) e condutividade elétrica aparente do solo (CEa), obtidos por meio da técnica da TDR, em condições de campo, sendo que, dentre eles, os modelos de RHOADES et al., (1976) e VOGELER et al., (1996) foram os melhores.

É possível monitorar a variação espacial e temporal de θ , por meio da técnica da TDR, em condições de campo, mas, essa capacidade se reduz com o aumento da salinidade do solo, implicando em redução da qualidade dos dados por ela obtidos.

A técnica da TDR apresentou limitação no monitoramento da variação espacial e temporal de CEa e CEw, em condições de campo, principalmente no solo da trincheira, na qual, o bananal foi adubado com 1.008 kg ha^{-1} por ano de K_2O .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, E.F.; OR, D. A parametric model for two-dimensional water uptake by corn roots under drip irrigation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.6, p.1039-1049, 1996.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.475-480, 2005.

COELHO FILHO, M.A.; COELHO, E.F.; SANTANA, G. da S.; COSTA, E.L. da. Perfil de distribuição de condutividade elétrica e potássio de um sistema de microaspersão em plantio de bananeira. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, **Anais...**, Salvador, SBEA, 2002. (CD ROM).

FOLEGATTI, M.V. **Fertirrigação: citrus, flores e hortaliças**. In: FOLEGATTI, M.V., Apresentação, p.7-8, 1999, 460p.

FRANSON, M.A.H. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 16 ed., American Public Health Association, Washington, DC, 1985.

GARCIA, R.V. **Sistema radicular de bananeira irrigada por aspersão convencional e microaspersão no projeto Jaíba, MG**. 2000. 47f. Dissertação

(Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from the sample time domain reflectometry. **Advanced Molex Relaxes Processes**, New York, v.7, n.1, p.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**, Madison, v.59, n.3, p.689-698, 1995.

KACHANOSKI, R.G.; PRINGLE, E.; WARD, A. Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, n.1, p.47-52, 1992.

LEDIEU, J.; DE RIDDER, P.; DE CLERCK, P.; DAUTREBANDE, S. A method measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.88, n.1, p.319-328, 1986.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.222, n.1-2, p.163-190, 2000.

MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, Washington, v.27, n.10, p.2771-2777, 1991.

MUÑOZ-CARPENA, R.; REGALADO, C.M.; ALVAREZ-BENEDÍ, J.; SOCORRO, A.R.; PÉREZ, N. Determinación simultánea mediante TDR del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: López, J.J.; Quemada, M. ed. V, **Temas de Investigación en Zona no Saturada**. Pamplona: Universidade Pública de Navarra, 2001, p.1-7.

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.

RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, n.2, p.433-439, 1989.

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**, Madison, v.40, n.5, p.651-655, 1976.

SOUZA, C.F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento**. 2002. 115f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VOGELER, I.; CLOTHIER, 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.

WARD, P.R.; DUNIN, F.X. Growing season evapotranspiration from duplex soils in south-western Australia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.50, n.2, p.141-159, 2001.

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

WRAITH, J.M; COMFORT, S.D.; WOODBURY, B.L.; INSKEEP, W.P. A simplified waveform analysis approach for monitoring solute transport using time-domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, n.3, p.637-642, 1993.

WRAITH, J.M; DAS, B.S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time domain reflectometry. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.47, n.1-2, p.145-150, 1998.

RESUMO E CONCLUSÕES GERAIS

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tem se mostrado ao longo dos anos, tratar-se de uma ferramenta com grande potencial de uso no monitoramento do teor de água no solo (θ) e da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), sendo isso feito, em tempo real, de forma automatizada, rápida e com o mínimo distúrbio da estrutura do solo. Além disto, esta técnica viabiliza, de forma indireta, o conhecimento da condutividade elétrica da solução do solo (CEw) e da concentração de nutrientes nesta solução (Ci) (WRAITH & DAS, 1998; MMOLAWA & OR, 2000 e NOBORIO, 2001).

Objetivou-se com este trabalho, avaliar, em condições de laboratório e de campo, seis modelos que relacionam θ , CEa e CEw (RHOADES et al., 1976; NADLER et al., 1984, modificado por RHOADES et al., 1989; RHOADES et al., 1989; MUALEN & FRIEDMAN, 1991; HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996), quanto à sua capacidade de estimar a CEw e a concentração de potássio na solução do solo (K), a partir de dados de θ e CEa, obtidos por meio da técnica da TDR, bem como, a viabilidade de uso dessa técnica no monitoramento da variação temporal e espacial de θ , CEa e CEw, em condições de campo.

Para se estimar K, os modelos foram adaptados com relações entre CEw e K do tipo potência (MMOLAWA & OR, 2000) e linear (HEIMOVAARA et al., 1995; VOGELER et al., 1996).

Na etapa de laboratório, um solo aluvial de classes texturais franca (CT_f) e franco-arenosa (CT_{fa}) foi acondicionado em vasos, de forma a se obter

densidades semelhantes àquelas que ocorrem em condições de campo. Com o solo correspondente a cada classe textural, montou-se uma bancada de 25 vasos, nos quais se aplicou cinco soluções de cloreto de potássio, com condutividades elétricas iguais a 1,0; 2,5; 4,0; 5,5 e 7,0 dS m⁻¹, de forma a se obter cinco teores de água no solo, correspondentes a 20; 40; 60; 80 e 100% da água disponível.

Na etapa de campo, duas trincheiras foram feitas em um bananal fertirrigado por um sistema de irrigação do tipo microaspersão. As trincheiras foram abertas na direção diagonal, em relação às linhas de plantio, partindo-se da planta para o microaspersor e, após a instalação das sondas de TDR, estas foram fechadas e mantidas em repouso por um período de 60 dias. Em uma das duas trincheiras, nas quais se monitorou a CEa, θ e CEw, o bananal foi adubado com 432 kg ha⁻¹ de K₂O por ano e na outra trincheira, adubado com 1.008 kg ha⁻¹ de K₂O por ano.

Para ambas as etapas (laboratório e campo), leituras de θ e CEa foram feitas por meio de um equipamento de TDR. A solução do solo foi extraída com o uso de extratores para, posteriormente, determinar CEw e K. A CEw foi determinada por meio de condutivímetro de mesa e K por meio de espectrofotômetro de chama. Na etapa de campo, o monitoramento de θ e CEa foi feito em 22 posições de perfis de solo; o equipamento de TDR foi acoplado a quatro caixas multiplexadoras (contendo cada uma oito canais), nas quais foram conectadas 22 sondas de TDR. Por sua vez, o monitoramento da CEw foi feito em seis das 22 posições.

Na etapa de campo, em cada trincheira, efetuaram-se leituras de θ , CEa e CEw durante oito dias, cobrindo dois eventos de fertirrigação. As leituras de θ e CEa foram feitas a cada 15 minutos, sendo seus valores armazenados em um datalogger. A solução do solo foi coletada 45 minutos antes e 45 minutos após cada evento de fertirrigação e, a partir daí, em intervalos de 24 horas, até 24 horas após o segundo evento de fertirrigação.

Para a etapa de campo, após o ajuste dos modelos aos dados de θ , CEa e CEw e, por conseguinte, obtidos os valores dos parâmetros desses modelos, procedeu-se, com o modelo que melhor se ajustou aos dados de θ , CEa e CEw, a uma estimativa da CEw para todo o perfil do solo monitorado com a

TDR (22 posições). Em seguida, perfis de θ , CEa e CEw foram feitos com os valores de θ e CEa obtidos com a TDR e de CEw estimados. Tais perfis foram feitos para os seguintes momentos: três horas antes e três horas após cada evento de fertirrigação e, a partir daí, em intervalos de 24 horas, até 24 horas após o segundo evento de fertirrigação, para as duas doses de K_2O .

A avaliação dos modelos, quanto à sua capacidade de relacionar as variáveis θ , CEa e CEw e θ , CEa e K, foi realizada com base no coeficiente de concordância (D), proposto por WILLMONTT (1981), no coeficiente de determinação (R^2) e no coeficiente angular da equação de uma reta do tipo $Y = aX$, após otimização de seus ajustes, por meio de planilha eletrônica.

É possível estimar a CEw, a partir de dados de θ e CEa, para condição de laboratório, por meio dos modelos avaliados, assim como, K, a partir de dados de θ e CEa, para condição de laboratório, por meio dos modelos de RHOADES et al. (1976), VOGELER et al. (1996) e MUALEN & FRIEDMAN (1991), adaptados com uma relação entre CEw e K do tipo potência, nas faixas de 0 a 60 e 0 a 120 $mg L^{-1}$, para solos de CT_f e CT_{fa} , respectivamente.

Os modelos estimaram bem a CEw, a partir de dados de θ e CEa, obtidos por meio da técnica da TDR, em condições de campo, sendo que, os modelos de RHOADES et al., (1976) e VOGELER et al., (1996) foram os melhores; é possível monitorar a variação espacial e temporal de θ , por meio da técnica da TDR, em condições de campo, mas, essa capacidade se reduz com o aumento da salinidade do solo, implicando em redução da qualidade dos dados por ela obtidos; e a técnica da TDR apresentou limitação no monitoramento da variação espacial e temporal de CEa e CEw, em condições de campo, principalmente no solo da trincheira, na qual, o bananal foi adubado com $1.008 kg ha^{-1}$ de K_2O por ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. Sonda de TDR para estimativa da umidade e condutividade elétrica do solo, com uso de multiplexadores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.475-480, 2005.

FRANSON, M.A.H. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 16 ed., American Public Health Association, Washington, DC, 1985.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from the sample time domain reflectometry. **Advanced Molex Relaxes Processes**, New York, v.7, n.1, p.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**, Madison, v.59, n.3, p.689-698, 1995.

MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.222, n.1-2, p.163-190, 2000.

MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S.P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, Washington, v.27, n.10, 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.

RHOADES, J.D.; MANTEGHI, N.A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, n.2, p.433-439, 1989.

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**, Madison, v.40, n.5, p.651-655, 1976.

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

VOGELER, I.; CLOTHIER, 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.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A



A

B

FIGURA 1A – Colunas de solo utilizadas para calibrar o equipamento de TDR para leitura de teor de água no solo: (A) vista aproximada das colunas de solo com as sondas de TDR inseridas no solo (B) equipamento de TDR fazendo de leituras de teor de água no solo.

APÊNDICE B



FIGURA 1B – Colunas de solo cobertas e em repouso, visando evitar perda de água por evaporação e assegurar melhor distribuição da solução de cloreto de potássio nas colunas de solo.



FIGURA 2B – Monitoramento da temperatura do solo.



FIGURA 3B – Colunas de solo contendo extratores de solução do solo, a fim de monitorar a condutividade elétrica da solução do solo e a concentração de potássio da solução do solo.

APÊNDICE C



FIGURA 1C – Bananal utilizado para realização do experimento de campo: de monitoramento do teor de água no solo, da condutividade elétrica aparente do solo, da condutividade elétrica solução do solo e da concentração de potássio na solução do solo.

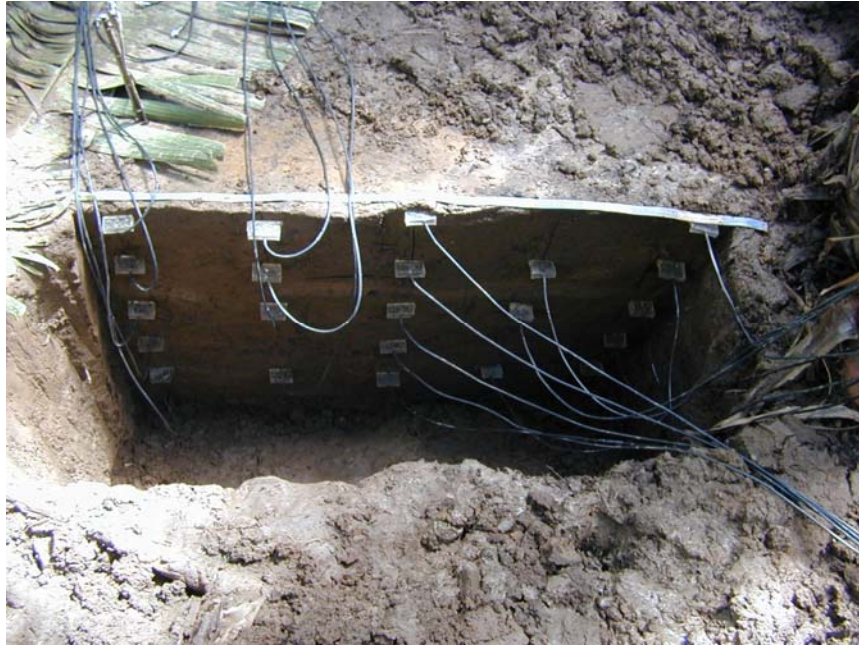


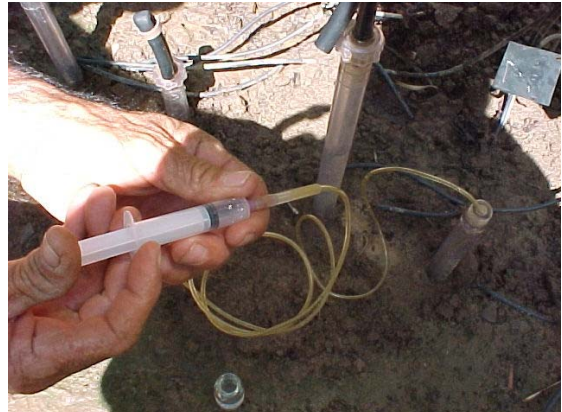
FIGURA 2C – Trincheira com as sondas de TDR recém-instaladas.



FIGURA 3C – Detalhe da instalação das caixas multiplexadoras e dos extratores de solução do solo, em campo.



A



B



C

FIGURA 4C – Detalhe da extração de solução do solo, em campo: coluna de solução do solo (A), coleta da solução do solo (B) e lavagem da seringa com água destilada (C).