

Marcelo Rocha dos Santos¹, Mauro Aparecido Martinez², João Henrique Zonta³

RESUMO

A TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) permite monitorar os íons do solo em tempo real a partir da determinação do teor de água (θ) e da condutividade elétrica do solo (CE_s), o que possibilita estimar a condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) e a concentração iônica de um dado nutriente (C_i). Objetivou-se com esse trabalho ajustar e testar modelos que estimem a concentração de fósforo e nitrato a partir de dados de teor de água e condutividade elétrica de Neossolo Quartzarênico (RQ) e Latossolo Vermelho (LV) com uso da TDR. Em colunas de solo foram aplicadas soluções de nitrato de cálcio e fosfato monoamônico com cinco concentrações e cinco diferentes teores de água. O modelo que melhor ajustou os dados de CE_{ss} com CE_s e θ foi o de Vogeler et al. (1996) seguido pelo modelo de Rhoades (1976). Para ambos, os solos e fertilizantes aplicados, são escolhido com base no coeficiente de determinação (r^2). A estimativa da C_i de fósforo em função de CE_s e θ foi realizada a partir da combinação de um modelo potencial, que correlacionou os dados de CE_{ss} e o teor de fósforo para baixa C_i no RQ e toda faixa de C_i para o LV, com o modelo de Vogeler et al. (1996), enquanto que para o nitrato em ambos os solos e fósforo para altas C_i no RQ, foi conjugado com um modelo linear. Os modelos superestimaram o fósforo a baixa concentração no RQ e subestimaram na alta concentração, assim como em toda faixa de concentrações estudadas para o LV. A concentração de nitrato foi subestimada para toda faixa avaliada para o RQ e superestimada para o LV.

Palavras-chave: condutividade elétrica do solo, fertirrigação, teor de água do solo, TDR.

ABSTRACT

MODELS TO DETERMINE PHOSPHORUS AND NITRATE CONCENTRATION IN QUARTZARENIC NEOSOL AND RED LATOSOL USING TDR

TDR (Time domain Reflectometry) allows monitoring soil ions in real time using the soil water content (θ) and the bulk electric conductivity (CE_s), which allows estimate electric conductivity of the soil solution (CE_{ss}) and the nutrient ionic concentration (C_i). This study was done to adjust and test models that estimate the concentrations of nitrate and phosphorus using data of soil water content and bulk electric conductivity of Quartzarenic Neosol (RQ) and Red Latosol (LV) using a TDR. The study was done in soil columns. Phosphorus and calcium nitrate solutions were applied in five different concentrations to soils at five different water contents. Based on determination coefficient (r^2), the model of Vogeler et al. (1996) followed by that of Rhoades (1976) best adjusted the CE_{ss} , CE_s and θ for both soils and fertilizer concentrations. Through the model of Vogeler et al. (1996), the phosphorus C_i as the function of CE_s and θ was estimated by combining a potential model, that correlated the data of CE_{ss} and the phosphorus content at low concentration of C_i in RQ and for the full range C_i in LV. On the other hand, a linear model was used for nitrate in both soils and for phosphorus at high concentrations in RQ. In RQ, the models overestimated low concentrations of phosphorous and underestimated high concentrations, and all concentrations studied in LV. The nitrate concentration was underestimated in RQ and overestimated in LV.

Keywords: bulk electric conductivity, fertirrigation, soil water content, TDR.

Recebido para publicação em 20/10/2009. Aprovado em 28/10/2009

1 - Estudante de doutorado, DEA-UFV/Viçosa – Brasil, e-mail: marrochas@yahoo.com.br

2 - Ph.D, professor, DEA-UFV/Viçosa – Brasil, e-mail: mmauro@ufv.br

3 - Estudante de doutorado, DEA-UFV/Viçosa – Brasil, e-mail: joaozonta@hotmail.com

INTRODUÇÃO

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

Embora exigido em quantidades menores do que o nitrogênio e o potássio, o fósforo é o nutriente que mais limita a produtividade de culturas na maioria dos solos. Apenas solos de alta fertilidade não necessitam de adubações fosfatadas nos primeiros anos de cultivo. De qualquer maneira, é bastante claro que deva haver constante reposição do fósforo em solução, o que se dá por meio da dissolução do fósforo lábil que está em equilíbrio com o fósforo em solução (RAIJ, 1991).

Estudos direcionados para o monitoramento da dinâmica de solutos no solo, sob áreas fertirrigadas, são de fundamental importância para manutenção dos recursos de solo e água. De acordo com Santana (2006), o monitoramento da variação espacial e temporal no teor de água (θ), da condutividade elétrica do solo (CE_s), da condutividade elétrica na solução do solo (CE_{ss}) e da concentração iônica (C_i), permite estimar a perda de água por percolação profunda, a evapotranspiração da cultura, a determinação de regiões de extração de nutrientes e possível perda de nutrientes por lixiviação, dentre outros. O autor ainda ressalva que a crescente conscientização da necessidade de uso racional dos recursos naturais e, ou, produtivos, especialmente a água, aliada ao avanço da eletrônica, tem contribuído para a intensificação dos estudos direcionados para o monitoramento de água no solo.

O monitoramento de íons no solo é geralmente realizado com a utilização de extrator de solução, realização de amostragem do solo ou o uso de extrato da pasta saturada do solo. O extrator é bastante popular entre os pesquisadores por apresentar resultados precisos a um custo relativamente baixo; porém, sua instalação no solo reduz a precisão dos resultados, pois altera o local em estudo, não permitindo repetições, e limita a obtenção de resultados a um curto espaço de tempo (SOUZA et

al., 2006). A amostragem do solo requer maior tempo para análise e é um processo destrutivo. O extrato da pasta saturada não representa o estado iônico do solo em tempo real. Uma técnica que tem sido utilizada para a avaliação do movimento de solutos no solo é a reflectometria no domínio do tempo (TDR) (BEJAT et al., 2000; MMOLAWA & Or, 2000), que permite o monitoramento de íons em tempo real, de forma contínua e precisa, mantendo-se a estrutura do solo.

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

A técnica do TDR consiste na emissão de um pulso eletromagnético, sendo a velocidade de propagação deste pulso no meio função de uma constante (ka), denominada constante dielétrica. Assim, o método do TDR depende da determinação do valor do θ para o solo. A diferença significativa entre a constante dielétrica da água e a constante dielétrica dos componentes da matriz do solo permite calcular o teor de água no solo.

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

Como existe a relação entre condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) e concentração iônica (C_i), pode-se, por intermédio de ensaios laboratoriais, gerar uma regressão com CE_{ss} em função C_i e, nesse mesmo ensaio, determinar CE_s e θ com uso da TDR, possibilitando a calibração dos modelos que relacionam CE_{ss} , CE_s e θ . Desta forma, com base em modelos que relacionam CE_{ss} e C_i , e, modelos que relacionam CE_{ss} , CE_s e θ , a TDR tem utilidade na estimativa da concentração iônica.

Para aplicação da TDR no monitoramento da distribuição de íons no solo, se torna necessário a calibração de alguns modelos que, ao serem conjugados um com o outro, possibilitam a estimativa da concentração iônica. Rhoades (1976); Nadler (1984); Rhoades et al. (1989); Mualen et al. (1991); Heimovaara et al. (1995); Vogeler et al. (1996) e outros propuseram modelos que relacionam condutividade elétrica da solução do solo com valores de teor de água e condutividade elétrica do solo. Estes modelos podem ser calibrados para cada tipo de solo e nutriente aplicado para estimar a CE_{ss} em função de CE_s e θ . Desta forma, é possível, com o uso da TDR, ter conhecimento da CE_{ss} , uma vez que são facilmente obtidas pela TDR as variáveis CE_s e θ .

Diante do exposto, objetivou-se com esse trabalho ajustar e testar modelos que estimem a concentração de fósforo e nitrato a partir de dados de teor de água e condutividade elétrica de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho com uso da TDR.

METODOLOGIA

O experimento foi conduzido no Laboratório de Física do Solo, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV, com uso de um Neossolo Quartzarênico (RQ) coletado no perímetro irrigado de Jaíba, MG e de um Latossolo Vermelho Ácrico típico (LV), ocorrente na região do Alto Paranaíba, próximo à cidade de Rio Paranaíba, MG.

Os seguintes modelos matemáticos foram usados para estimar CE_{ss} em função de θ e da CE_s .

Modelo 1 - Rhoades (1976):

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

em que

CE_{ss} = é a condutividade elétrica na solução do solo ($dS\ m^{-1}$);

CE_s = a condutividade elétrica do solo ($dS\ m^{-1}$);

CE_{fs} = a condutividade elétrica na fração sólida do solo; θ o teor de água no solo ($m^3\ m^{-3}$), e “a” e “b” são parâmetros de ajustes da equação.

Modelo 2 - Nadler (1984):

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

em que

F_T = um fator de correção da CE_s ($S\ m^{-1}$) quanto ao efeito da temperatura (adimensional);

δ = é parâmetro empírico;

F_θ = é um fator de correção quanto à tortuosidade do fluxo de corrente elétrica (adimensional). Os valores de F_T , δ e F_θ são obtidos utilizando-se as equações, 3, 4 e 5, respectivamente:

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

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

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

em que

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

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

θ_{ws} = a água higroscópica no solo ($m^3\ m^{-3}$), corresponde o teor de água adquirido por uma amostra de solo seco ao ar depois de ser submetida a um ambiente com 100% de teor de água relativa do ar.

Diferenciando do teor de água residual, que é a quantidade de água contida em uma amostra de solo seco ao ar e depois de ser seca em estufa à temperatura e 105 $^\circ C$.

Modelo 3 - Rhoades et al. (1989):

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

em que,
 “c” e “d” = parâmetros de ajuste da equação.

Modelo 4 - Mualen et al. (1991):

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

em que
 α = um parâmetro de ajuste da equação

Modelo 5 - Heimovaara et al. (1995):

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

em que
 θ_r = o teor de água residual (m³ m⁻³);
 Θ = a saturação efetiva do solo; “β”, “m” e “q” são parâmetros de ajuste da equação. A saturação efetiva do solo é obtida utilizando-se a equação 9.

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

em que
 θ_s = o teor de água na saturação (m³ m⁻³) determinado utilizando-se a equação 10

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

em que
 ρ_s e ρ_p = a massa específica do solo e das partículas do solo, respectivamente (g cm⁻³)

Modelo 6 - Vogeler et al. (1996):

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

em que,
 “e”, “f”, “g” e “h” são parâmetros de ajuste da

equação.

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

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

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

Foram realizados, para essa calibração, quatro experimentos, sendo estes com aplicação de diferentes concentrações de MAP e nitrato de cálcio no RQ e LV.

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

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

Vinte e quatro horas após a aplicação da solução em cada coluna foi inserida, verticalmente, uma sonda, a qual foi acoplada a um multiplexador ligado a uma TDR 100 (Campbell Scientific), para realização das leituras de CE_s e θ. No momento das leituras com a

TDR, foi feita a medição da temperatura do solo por meio de sensor Termopar conectado ao Datalogger CR10X. Imediatamente após cada leitura, a sonda foi retirada e no mesmo local inserido um extrator de solução. Ao extrator era aplicada uma sucção de aproximadamente 80 kPa e esperado um tempo suficiente para a extração da solução, a qual era armazenada em frascos devidamente limpos.

A quantidade de solução extraída variava de aproximadamente 8 mL para o menor teor de água no solo a 25 mL quando o solo estava próximo à saturação. Nestas soluções extraídas eram feitas as determinações

da condutividade elétrica da solução do solo (CE_{ss}) e dos teores de fósforo e de nitrato. A condutividade elétrica da solução do solo foi medida com uso de condutivímetro de bancada e os teores de fósforo e nitrato determinados por espectrofotômetro pelo método colorimétrico (YANG *et al.*, 1998) no Laboratório de Qualidade de Água do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Os dados de CE_s e de teores de água, obtidos utilizando-se a TDR, e os dados de CE_{ss} medidos foram usados para ajustar, pelo Método dos Mínimos Quadrados, os parâmetros referentes às equações 3, 4, 8, 9, 10 e 11. Modelos do tipo potencial e linear, relacionando

Quadro 1. Modelos para estimativa de CE_{ss} em Neossolo Quartzarênico fertirrigado com fosfato monoamônico

Nutriente	Modelo	R^2	
F ó s f o r o Baixa Ci	Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0345}{-2,176\theta^2 + 1,5878\theta}$	0,80
	Nadler (1984)	Não ajustou aos dados	-
	Rhoades et al. (1989)	Não ajustou aos dados	-
	Mualen et al. (1991)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0345}{\left(\frac{\theta^{1,1666}}{\theta_s}\right)}$	0,71
	Heimovaara et al. (1995)	$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{0,213}} \right)^{0,213} \right]}{(\theta - 0,05)^{1,70268+1} \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{0,90058}} \right)^{0,90058} \right]^2}$	0,80
Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,434417\theta + 0,021373)}{(0,475695\theta + 0,030135)}$	0,97	
Fósforo alta Ci	Rhoades (1976)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0121}{-1,34349\theta^2 + 1,0474\theta}$	0,90
	Nadler (1984)	$CE_{ss} = F_T (CE_s - \delta CE_{fs}) F_\theta$	0,57
	Rhoades et al. (1989)	Não ajustou aos dados	-
	Mualen et al. (1991)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - 0,0125}{\left(\frac{\theta^{1,4019}}{\theta_s}\right)}$	0,37
	Heimovaara et al. (1995)	$CE_{ss} = \frac{CE_s \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{0,7166}} \right)^{0,7166} \right]}{(\theta - 0,05)^{0,840423+1} \left[1 - \left(1 - \Theta^{\frac{1}{8,45447}} \right)^{8,45447} \right]^2}$	0,89
Vogeler et al. (1996)	$CE_{ss} = \frac{CE_s - (0,358553\theta + 0,020258)}{(0,350974\theta + 0,047314)}$	0,93	

CE_{ss} e a concentração do nutriente (C_i), para cada solo e nutriente aplicado, também foram ajustados.

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

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos solos em estudo, o modelo que melhor estimou a CE_{ss} foi o de Vogeler et al. (1996), seguido pelos modelos de Rhoades (1976) e Heimovaara et al. (1995), nas equações 11, 1 e 8, para o fósforo e para o nitrato (Quadros 3, 4, 5 e 6). É importante frisar que, apesar do modelo de Vogeler et al. (1996) ter sido proposto para solos com elevada agregação, este se ajustou bem aos dados para o Neossolo Quartzarênico, de textura arenosa.

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

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

Os modelos lineares e potenciais que relacionam a condutividade elétrica da solução do solo à concentração do nutriente estão mostrados no Quadro 5.

No Neossolo Quartzarênico, o modelo que melhor relacionou a CE_{ss} à concentração do fósforo na solução do solo foi o potencial (Quadro 5), quando esta era baixa, e o linear, quando a concentração era alta. No caso do nitrato, a diferença entre os modelos linear e potencial foi mínima. Assim, foi utilizado o modelo linear para estimar CE_{ss} a partir de C_i , para toda faixa de concentração estudada.

Quadro 2. Modelos para estimativa de CE_{ss} em Neossolo Quartzarênico fertirrigado com nitrato de cálcio

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

Quadro 3. Modelos para estimativa de CE_{ss} para Latossolo Vermelho fertirrigado com MAP

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

Quadro 4. Modelos para estimativa de CE_{ss} para Latossolo Vermelho fertirrigado com nitrato de cálcio

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

Quadro 5. Modelos que relacionam a condutividade elétrica de equilíbrio na solução do solo (CE_{ss}) à concentração do nutriente (C_i) na solução nele aplicada

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

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

No Latossolo Vermelho, o modelo potencial (Quadro 5) foi o que possibilitou que se obtivesse melhor estimativa da CE_{ss} a partir da concentração do fósforo, enquanto que para o nitrato o melhor modelo foi o linear. Os modelos que proporcionaram que se obtivessem melhores estimativas das concentrações de fósforo e nitrato no Neossolo Quartzarênico e Latossolo Vermelho estão apresentados no Quadro 6.

A combinação do modelo de Vogeler et al. (1996) (Quadro 1) com os modelos potencial e linear (Quadro 5) resultaram nos modelos para a estimativa do fósforo no Neossolo Quartzarênico (Quadro 6). Para esse mesmo solo, o modelo para estimativa da concentração de nitrato (Quadro 6) foi obtido combinando-se o modelo linear (Quadro 5) com o de Vogeler et al. (1996) (Quadro 2).

No caso do Latossolo Vermelho, o modelo para estimativa da concentração do fósforo (Quadro 6) foi obtido combinando o modelo potencial (Quadro 5) com o de Vogeler et al. (1996) (Quadro 3). Já para o nitrato, o modelo apresentado no Quadro 6 foi resultante da combinação do modelo linear (Quadro 5) com o modelo de Vogeler et al. (1996) (Quadro 4).

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

Analisando a Figura 1, verifica-se que para o

Neossolo Quartzarênico, os modelos proporcionaram uma superestima da concentração de fósforo medida em 14,84%, quando aplicadas soluções com fósforo em baixa concentração, e subestimaram a concentração do fósforo medida em 0,73% quando aplicadas soluções com alta concentração de fósforo. No caso do nitrato, o modelo proporcionou subestimativa da concentração medida em 1,30%. Na Figura 2, nota-se que, em média, os modelos ajustados (Quadro 6) proporcionaram subestimativas das concentrações de fósforo medidas em 2,89%, e superestimativas da concentração de nitrato em 1,92, % para o Latossolo Vermelho. Estes resultados mostram que é possível, utilizando-se a TDR, estimar a concentração iônica no solo com uma boa precisão.

CONCLUSÕES

- Os modelos de Rhoades (1976) e o de Vogeler et al. (1996) ajustados aos dados de CE_{ss} , CE_s e θ , conjugados com um modelo que relaciona CE_{ss} e concentração do íon, mostraram-se eficazes para estimar, utilizando-se a TDR, a concentração de nutrientes em Neossolos Quartzarênico e Latossolo Vermelho fertirrigados;
- Os modelos superestimaram o fósforo na faixa de baixas concentrações no Neossolo Quartzarênico e subestimaram em altas concentrações, assim como em toda faixa de concentração estudada para o Latossolo Vermelho;
- A concentração de nitrato foi subestimada para toda faixa avaliada para o Neossolo Quartzarênico e superestimada para o Latossolo Vermelho.

Quadro 6. Modelos para estimativa da concentração do fósforo e do nitrato ($mg L^{-1}$) nos solos em estudo

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

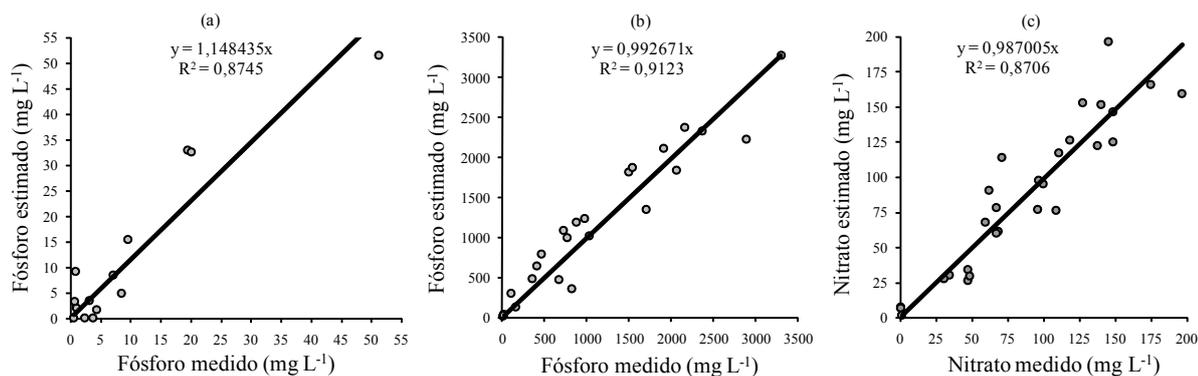


Figura 1. Relação entre as concentrações estimadas e medidas de fósforo na solução do solo, para baixas (a) e altas concentrações (b) e de nitrato na solução do solo (c) no Neossolo Quartzarênico.

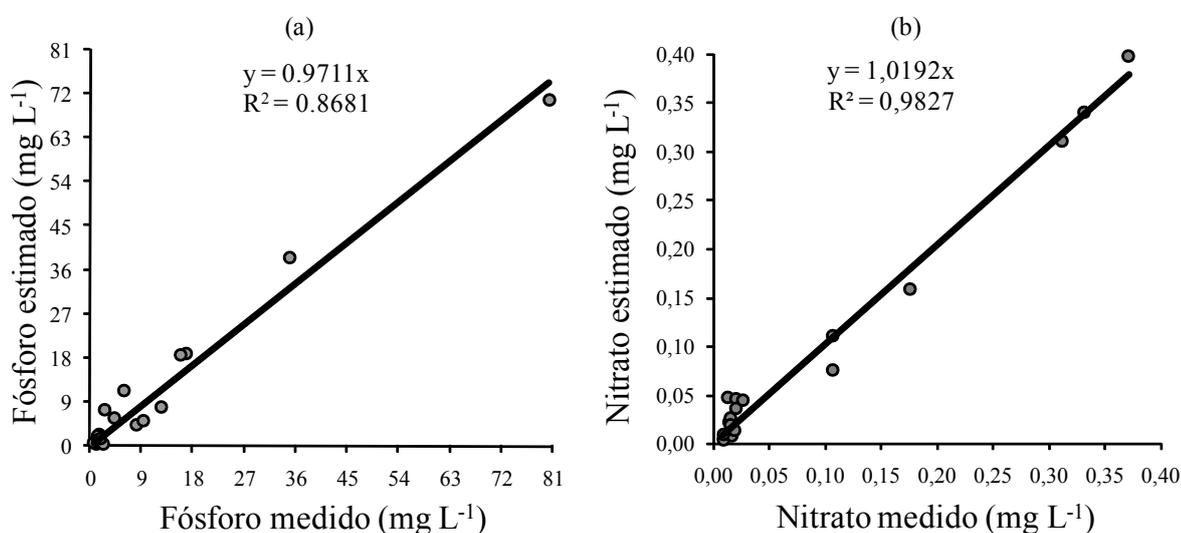


Figura 2. Relação entre as concentrações estimadas e medidas de fósforo na solução do solo (a) e nitrato na solução do solo (b) no Latossolo Vermelho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEJAT, L.; PERFECT, E.; QUINSENBERRY, V.L.; COYNE, M.S.; HASZLER, G.R. Solute transport as related to soil structure in unsaturated intact soil blocks. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, n.3, p.818-26, 2000.

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

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.

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

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

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

- SANTANA, G. S.; COELHO, E. F.; SILVA, T. S. M.; RAMOS, M. M.; COELHO FILHO, M. A. Estimativa da condutividade elétrica da solução do solo em função da umidade e da condutividade elétrica aparente. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 33, 2004, São Pedro. **Resumos...** São Pedro: SBEA, 2004, CD-Rom.
- SANTOS, M. R.; COELHO, E. F.; SILVA, A. J. P.; COELHO FILHO, M. A. Modelos para monitoramento da distribuição de íons no solo sob fertirrigação com fósforo, usando TDR. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34, 2005a, Canoas. **Resumos...** Canoas: SBEA, 2005a, CD-Rom.
- SANTOS, M. R.; COELHO, E. F. ; SILVA, A. J. P. Modelos para estimativa da distribuição de íons no solo sob aplicação de nitrato de cálcio usando reflectometria no domínio do tempo. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem - Simpósio Internacional de águas Subterrâneas, 15, 2005b, Teresina. **Resumos...** Teresina: ABID, 2005b, CD-Rom.
- MMOLAWA, K.; OR, D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review. **Plant and Soil**, v.222, n.1-2, p.163-90, 2000.
- MUALEN, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, v.27, p.2771-2777, 1991.
- NADLER, A., FRENKEL, H., MANTELL, A. Applicability of the four-probe technique under extremely variable water contents and salinity distribution. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.1258-1261, 1984.
- RHOADES, J. D., RAATS, P. A., PRATHER, R. J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, p.651-655, 1976.
- RHOADES, J. D., MANTEGHI, N. A., SHOUSE, P. J., ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society America Journal**, v.53, p.433-439, 1989.
- SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; MATSURA, E.E.; OR, D. Calibração da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p. 282-291, 2006.
- VOGELER, I.; CLOTRIER, B. E.; GREEN, S. R.; SCOTTER, D. R.; TILLMAN, R. W. Characterizing water and solute movement by TDR and disk permeametry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.1, p.5-12, 1996.
- YANG, J. E.; SKOGLEY, E. O.; SCHAFF, B. E.; KIM, J. J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Science Society**, Sm. J. v. 62, p. 1108-1115, 1998.
- WRAITH, J. M., DAS, B. S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time-domain reflectometry. **Soil and Tillage Research**, v.47, p 145-150, 1998.