

## CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DE SOLO EM FUNÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E DA UMIDADE DO SOLO SOB APLICAÇÃO DE CLORETO DE POTÁSSIO COM USO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO TEMPO

**Tibério Santos Martins da Silva<sup>1</sup>; Vital Pedro da Silva Paz<sup>2</sup>; Eugênio Ferreira Coelho<sup>3</sup>; Maurício Antônio Coelho Filho<sup>3</sup>; Gessionei da Silva Santana<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, BA, [tiberio\\_s@hotmail.com](mailto:tiberio_s@hotmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas-BA,

<sup>3</sup>Embrapa Mandioca e Fruticultura, Cruz das Almas-BA

<sup>4</sup>Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG,

### 1 RESUMO

O trabalho teve como objetivo definir, em campo e em laboratório, modelos matemáticos que melhor relacionam a condutividade elétrica aparente (CEa), a umidade do solo ( $\theta$ ) e a condutividade elétrica da solução do solo (CEw) sob aplicação de cloreto de potássio, via água de irrigação por gotejamento. O experimento consistiu de leituras de CEa e  $\theta$  com um analisador de umidade de reflectometria no domínio do tempo (TDR) em colunas de solo em laboratório e em várias posições de uma malha retangular de um perfil do solo, em condições de campo, seguido da extração de solução iônica nas respectivas posições. Foram ajustados modelos lineares e não lineares relacionando CEa,  $\theta$  e CEw. O resultados permitiram concluir que a CEw da solução do solo pode ser monitorada a partir de leituras de CEa pela TDR para fins de distribuição de solutos no solo sob fertirrigação, com uso dos modelos de Rhoades et al. (1976), Vogeler et al. (1996), Nadler et al. (1984) e empírico em condições de campo e laboratório. O modelo de Rhoades et al. (1989) e Rhoades et al. (1976) mostraram-se adequados apenas para os estudos em laboratório.

**UNITERMOS:** fertirrigação, TDR

**SILVA, T. S. M. DA; PAZ, V. P. DA S.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; SANTANA, G. DA S. SOIL SOLUTION ELECTRICAL CONDUCTIVITY AS A FUNCTION OF BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL WATER CONTENT UNDER POTASSIUM CHLORIDE APPLICATION USING TIME DOMAIN REFLECTOMETRY**

### 2 ABSTRACT

This study aimed to define mathematical models that suitably relate bulk electrical conductivity (CEa), soil water content ( $\theta$ ) and soil solution electrical conductivity (CEw) under potassium chloride application by drip irrigation. The experiment consisted of readings of CEa and  $\theta$  using a Time Domain Reflectometry analyzer (TDR) in soil columns in laboratory and on several positions of rectangular soil profile grid under field conditions. Ionic solution was extracted in all positions of TDR readings. Linear and non-linear models relating CEa,  $\theta$  and CEw were adjusted to laboratory and field data. Results allowed to conclude that CEw may be monitored by readings of CEa from TDR for soil solute distribution under fertirrigation, using models of Rhoades et al. (1976), Vogeler et al. (1996), Nadler et al. (1984) and an empirical model in lab and in field. The models of de Rhoades et al. (1989) e Rhoades et al. (1976) were suitable only for laboratory studies.

**KEYWORDS:** fertirrigation, soil electrical conductivity, TDR

### 3 INTRODUÇÃO

O monitoramento de íons no solo constitui-se numa das principais práticas de manejo de fertirrigação, que tem sido realizado por meio de amostragens do solo ou por uso de extratores de solução. As amostragens de solo são destrutivas e sujeitas a variabilidades. O uso de extratores não permite o conhecimento das condições químicas do solo em tempo real e se limita a regiões de umidades mais altas do volume molhado. Uma alternativa para esse monitoramento é o uso da reflectometria no domínio do tempo (TDR), onde uma sonda de TDR pode ao mesmo tempo estimar num dado local do solo a umidade e a condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ), permitindo inferir sobre a condutividade elétrica da solução do solo ( $CE_w$ ). A  $CE_a$  é uma resultante da fase líquida do solo que ocupa a porosidade ( $CE_b$ ) e da condutividade elétrica referente aos cátions trocáveis situados na interface líquido sólido ( $CE_s$ ), que segundo Rhoades et al. (1976), é representada pela expressão:

$$CE_a = CE_b + CE_s \quad (1)$$

Vários modelos matemáticos têm sido usados para estimar  $CE_a$  em função de  $\theta$  e da  $CE_w$ , sendo o mais usual o proposto por Rhoades et al. (1976), ou seja:

$$CE_a = T\theta CE_w + CE_s \quad (2)$$

em que  $T$  é o coeficiente de transmissão, que considera a tortuosidade das linhas de corrente e o decréscimo na mobilidade dos íons nas interfaces água-solo e água-espaço poroso, que varia linearmente com  $\theta$ , isto é,  $T = a\theta + b$ . O autor obteve valores de  $CE_s$  entre 0,18 a 0,45 dS m<sup>-1</sup> para quatro diferentes tipos de solo, tendo a textura papel predominante na obtenção deste parâmetro.

Nadler et al. (1984) estimaram a  $CE_w$  em função da umidade e da  $CE_a$  da seguinte forma:

$$CE_w = F_T (CE_a - \delta CE_s) F(\theta) \quad (3)$$

em que  $F_T$  é um fator de correção da temperatura para 25°C,  $\delta$  é um parâmetro empírico e  $F(\theta)$  é o fator que leva em conta a tortuosidade do fluxo de corrente elétrica. Noborio et al. (1994) e Risler et al. (1996), estimaram  $F(\theta)$  usando um coeficiente de transmissão proposto por Rhoades et al. (1976), ou seja:

$$F(\theta) = \frac{1}{\theta T} \quad (4)$$

em que  $T$  é o coeficiente de transmissão expresso como  $T = a\theta + b$  (sendo  $a$  e  $b$  constantes determinadas empiricamente e dependentes do tipo de solo).

Rhoades et al. (1976) propuseram  $\delta = 1$  na equação (3), porém em outro trabalho Rhoades et al. (1989) expressam  $\delta$  e  $F(\theta)$  para  $CE_w > 0,2 - 0,4$  e  $CE_s < 0,15$  S m<sup>-1</sup>:

$$\delta = \frac{(\phi_s + \theta_{ws})^2}{\phi_s} \quad (5)$$

$$F(\theta) = \frac{1}{(\theta - \theta_{ws})} \quad (6)$$

onde  $\phi_s$  é o conteúdo volumétrico do material sólido do solo (m<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup>),  $CE_w$  condutividade elétrica da água de cristalização (S m<sup>-1</sup>),  $\theta_{ws}$  é o conteúdo da água de cristalização (m<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup>) e  $\theta$  é o conteúdo total de água (m<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup>).

Mualem e Friedman (1991) definiram  $CE_a$  pela função:

$$CE_a = CE_w \theta_{ef} F(\theta_{ef}) \quad (7)$$

em que o fator de tortuosidade  $F(\theta_{ef})$  não pode ser medido, pois não há uma forma para se medir a geometria dos poros. Por isso, propuseram o conceito de que  $F(\theta_{ef})$  é igual ao quociente da condutividade hidráulica do solo ( $K_{solo}$ ) pela condutividade hidráulica de um feixe de capilares ( $K_{cap}$ ) com a mesma condutividade hidráulica. Isto levou a seguinte expressão para  $F(\theta_{ef})$ :

$$F(\theta_{ef}) = \frac{K_{solo}(\theta)}{K_{cap}(\theta)} = \theta_{ef}^{\beta} \frac{\left[ \int_0^{\Theta} \frac{1}{h(x)} dx \right]^2}{\int_0^{\Theta} \frac{1}{h(x)^2} dx} \quad (8)$$

Na qual  $\Theta$  é a saturação relativa,  $(\theta - \theta_{ws})/(\theta_{sat} - \theta_{ws})$ , sendo  $\theta_{sat}$  o conteúdo de água na saturação,  $\theta_{ws}$  o conteúdo de água de cristalização e  $h(x)$  a função de retenção de água no solo. Os autores usaram a função de Van Genuchten (1980), que apresentou melhor ajuste para os dados de umidade na saturação:

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (ah)^n} \right]^m \quad (9)$$

Onde  $a$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros empíricos. Substituindo a equação 9 na equação 8 obtém-se:

$$f(\Theta) = 1 - \left( 1 - \Theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \quad (10)$$

Para obtenção da equação 8 o autor assumiu para o numerador  $f(\Theta) = \int_0^{\Theta} dx/[h(x)]$ ,  $m = 1 - 1/n$ , e para o denominador  $f(\Theta) = \int_0^{\Theta} dx/[h(x)^2]$ ,  $m = 1 - 2/n$ . Desse modo na equação 9 tem-se  $m = (1 - 1/n)$  e  $m = (1 - 2/n)$ . Para aplicar estas duas funções na equação 8, ambas devem ser obtidas com os mesmos dados de retenção de água. Neste caso o valor de  $n$  no numerador será diferente do denominador. Conseqüentemente, definiu-se os parâmetros  $n$  e  $m$  no denominador por  $p$  e  $q$ , respectivamente, com  $q = 1 - 2/p$ . obtendo-se assim, pela substituição dos dois termos da equação 6, onde  $m = (1 - 1/n)$  e  $q = (1 - 2/p)$  a seguinte equação:

$$CE_a = CE_w \cdot (\theta - \theta_r)^{\beta+1} \frac{\left[ 1 - \left( 1 - \theta^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2}{1 - \left( 1 - \theta^{\frac{1}{p}} \right)^q} \quad (11)$$

Existem outros modelos matemáticos, como o proposto por Rhoades et al. (1989):

$$CE_a = [\theta - (c\theta + d)]CE_w + \frac{(\theta_{sol} + c\theta + d)^2}{\theta_{sol}} \quad (12)$$

em que  $\theta_{sol}$  é a fração volumétrica ocupada pelos solutos do solo e que pode ser calculada pela relação entre os valores de densidade aparente e densidade real.

Vogeler et al. (1996) propuseram um modelo empírico para solos agregados:

$$CE_a = (c\theta - d)CE_w + (a\theta - b) \quad (13)$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são parâmetros empíricos em função tipo de solo. Estes pesquisadores constataram forte dependência das leituras de CEa com as características físicas do solo, o que interferiu na parametrização da equação, sendo que houve o caso de não ter obtido bom ajuste com um solo arenoso.

Vogeler et al. (1996), em solo franco arenoso, obtiveram sucesso na otimização de parâmetros com modelo de Rhoades et al. (1976). Nadler et al. (1984), Noborio et al. (1994), Risler et al. (1996) e Mallants et al (1996), citados por Noborio (2001) e Nissen et al. (1998) encontraram bons resultados ao relacionar CEw, CEa e  $\theta$  utilizando alguns dos modelos propostos como Rhoades et al. (1976), Rhoades et al. (1989) e Vogeler et al. (1996).

A literatura mostra que existem ferramentas para explicar a relação entre CEa, CEw e  $\theta$ , o que deve ser avaliado em diferentes condições edáficas e químicas do solo e sob opções de fertirrigação quanto a frequência e tipo de fertilizante aplicado.

O trabalho teve como objetivo definir, em campo e em laboratório, modelos matemáticos que relacionam a condutividade elétrica aparente (CEa), a umidade do solo ( $\theta$ ) e a condutividade elétrica da solução do solo (CEw) em condições de aplicação de cloreto de potássio via água no volume molhado do solo sob irrigação por gotejamento.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi constituído em duas etapas, a primeira em laboratório e a segunda em campo. Em ambas as etapas, o solo apresentou as seguintes características físicas: areia total 444 g kg<sup>-1</sup>, silte 131 g kg<sup>-1</sup>, argila 425 g kg<sup>-1</sup>, densidade de partículas 2,55 kg dm<sup>-3</sup>. A umidade referente ao potencial de -10 kPa foi de 0,2157 kg kg<sup>-1</sup> e a umidade referente a 1500 kPa foi de 0,1276 kg kg<sup>-1</sup>.

Os dados de CEa, CEw e umidade obtidos em laboratório e campo, foram utilizados nos principais modelos recomendados em literatura; Rhoades et al. (1976); Rhoades et al. (1989), Vogeler et al. (1996); Rhoades et al. (1989); Nadler et al. (1984); Heimovaara et al. (1995) e um modelo empírico ajustado por análise de regressão linear.

### 4.1 Experimento em laboratório

Sondas de TDR foram confeccionadas com hastes de 0,10 m de comprimento e calibradas em laboratório, resultando num modelo cúbico entre a umidade obtida por gravimetria ( $\theta_g$ ), com base em volume, e a umidade lida na TDR, ou seja:

$$\theta_g = 4,119 (\theta_{TDR})^3 - 3,005 (\theta_{TDR})^2 + 1,417 (\theta_{TDR}) - 0,075 \quad (14)$$

O solo destorroado e seco ao ar foi passado em peneira de dois milímetros e colocado em tubos de PVC com 0,1 m de diâmetro e 0,19 m de altura, sendo compactado até alcançar a densidade aparente de 1,34 kg dm<sup>-3</sup>. As colunas de solo receberam soluções de cloreto de potássio de forma a se conseguir seis níveis de umidade, correspondentes a 15, 30, 45, 60, 75 e 90% da água disponível. Cada lâmina recebeu uma certa quantidade de cloreto de potássio para atingirem seis níveis de condutividade elétrica: 0,2; 0,8; 1,4; 2,0; 2,6; 3,2 dS m<sup>-1</sup>.

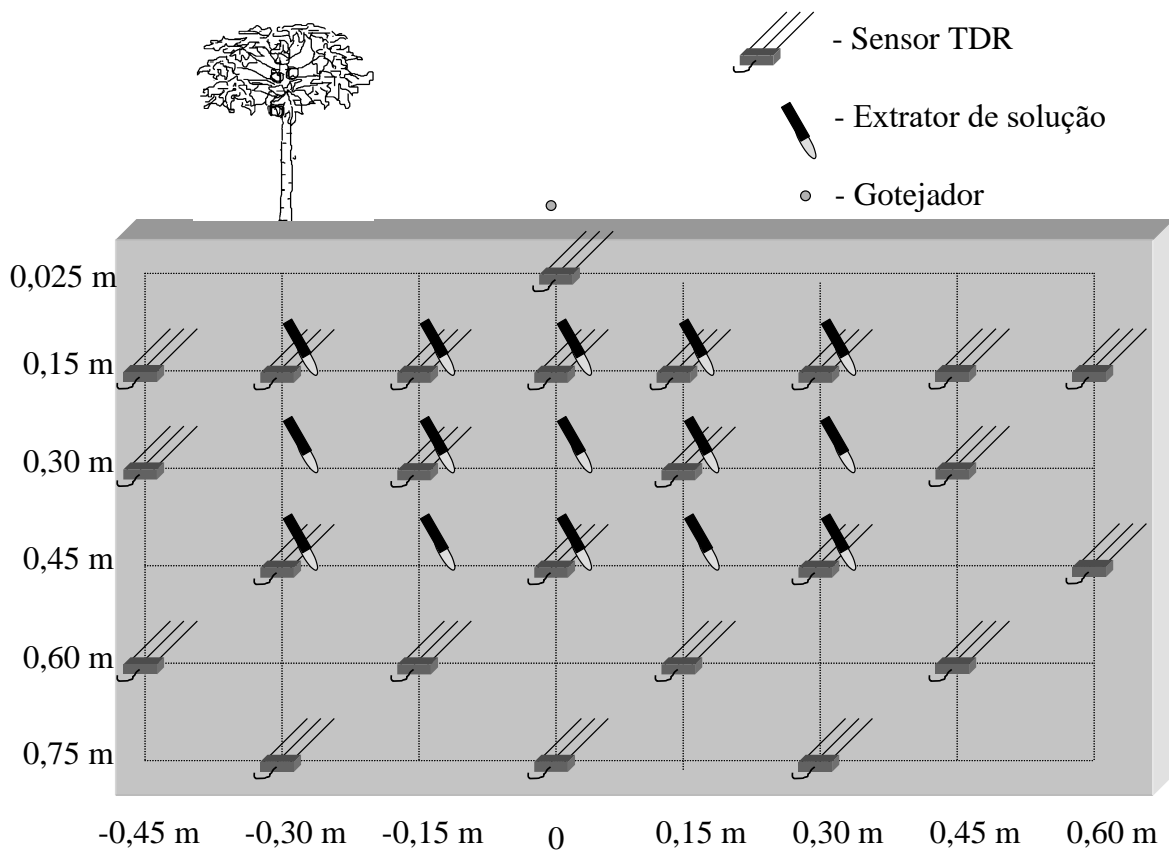
Após 24 horas da aplicação das soluções, foram realizadas leituras simultâneas de  $\theta$  e CEa utilizando-se uma sonda de TDR com três hastes de 0,10 m de comprimento, construída conforme Vellame et al. (2003), conectada a um analisador de umidade TDR 100 (CAMPBELL Co.). Após as leituras, um extrator de solução foi introduzido no mesmo local de inserção da sonda, sendo aplicada uma tensão de 70 kPa ao mesmo com uso de uma bomba de vácuo manual. Esperou-se o tempo necessário para se extrair uma quantidade de solução de 12 ml para a determinação da CEw, o que foi feito com um condutivímetro de mesa. Durante o procedimento de leitura, a temperatura do solo foi medida com um termopar de cobre-constantan ligado a um "datalogger". Os dados de CEa e  $\theta$  lidos pela TDR e os dados de CEw medidos no laboratório foram agrupados para os ajustes dos modelos por otimização com uso de planilha eletrônica.

### 4.2 Experimento em campo

O estudo foi desenvolvido em uma área cultivada com mamão (*Carica papaya L.*) cultivar Tainung n° 1, plantada em outubro de 2002, no campo experimental da Embrapa Mandioca e Fruticultura. Selecionou-se uma planta irrigada por um gotejador de 3,75 L.h<sup>-1</sup>, situado a 0,30 m da mesma, na direção da fileira, estabelecendo-se, assim, uma condição de ponto fonte, para melhor caracterização da distribuição de umidade e da condutividade elétrica no perfil do solo.

O sistema de aquisição de dados incluiu uma TDR 100, um armazenador de dados eletrônico (datalogger) e três multiplexadores de oito canais, programado para leituras em intervalos de 10 minutos durante o período de coleta.

Foi aberta uma trincheira na direção da fileira de plantas para instalação de 24 sondas de TDR, inseridas em posição horizontal. O posicionamento das sondas, na direção vertical, no perfil, partiu de 0,025m até 0,75m a partir da superfície do solo, com incrementos de profundidade de 0,15 m. Na direção horizontal os sensores foram posicionados à 0,15 m de distância da planta estendendo-se até 0,75m de distância da mesma, com incrementos de 0,15 m, conforme a Figura 1.



**Figura 1.** Disposição das sondas de TDR e das cápsulas porosas dos extratores de solução.

Foram instalados extratores de solução nas mesmas posições dos sensores, dispostos em ângulo de 45° com a parede da trincheira, com a cápsula porosa à 0,003 m da sonda de TDR. A irrigação durou duas horas e quarenta minutos e a fertirrigação foi feita durante vinte minutos, utilizando-se o cloreto de potássio como fonte de  $K_2O$ . A água de irrigação apresentou condutividade elétrica (CE) igual a  $0,30 \text{ dS m}^{-1}$  e durante a fertirrigação elevou-se para um máximo de  $3,54 \text{ dS m}^{-1}$ . Após a coleta das soluções dos extratores, estas foram levadas ao laboratório para determinação da CEw com um condutivímetro de mesa.

Foi aplicada sucção equivalente a uma tensão de 70 kPa nos extratores com uma bomba de vácuo manual em dois períodos, uma hora e quatro horas após a fertirrigação. As soluções foram coletadas 90 a 120 minutos após a sucção. A umidade e a condutividade elétrica aparente corresponderam à média dos valores coletados pela TDR durante o tempo de extração de solução com extratores, que ocorreu uma e quatro horas após a irrigação.

Os dados de CEa e  $\theta$  obtidos em campo e em laboratório pela TDR e as medidas de CEw obtidas com o condutivímetro foram agrupados para o ajuste de modelos matemáticos aos mesmos. Os modelos foram avaliados qualitativamente quanto à precisão, pelo coeficiente de determinação. Quanto à exatidão, verificou-se o coeficiente angular do gráfico  $Y = AX$ , onde quanto mais próximo de 1,0 ou a reta ajustada estiver da reta 1:1, maior é a exatidão do modelo. O modelo empírico consistiu da relação linear  $CEa = a + b \theta + c CEw$ .

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 estão apresentados os modelos ajustados aos dados de CEa, CEw e  $\theta$  obtidos no

experimento de laboratório. Todos os modelos ajustados apresentam coeficientes de determinação superiores a 0,90, indicando bons ajustes.

Os modelos de Vogeler et al. (1996), Rhoades et al. (1989) e o empírico obtiveram em laboratório maiores coeficiente de determinação (Tabela 1) do que os demais modelos, indicando boa estimativa de CEa em função de CEw e  $\theta$ . O modelo de Nadler et al. (1984), que estima CEw em função de CEa e  $\theta$  obteve um valor de coeficiente de determinação igual a 0,938, valor que está próximo pelos alcançados pelos modelos de Vogeler et al. (1996), Rhoades et al (1989) e o empírico (Tabela 1).

**Tabela 1.** Modelos matemáticos ajustados aos dados de CEw, CEa e  $\theta$  obtidos em laboratório.

Modelo	Coeficientes								
	a	b	c	D	CEs	m	q	$\beta$	r <sup>2</sup>
Rhoades et al. (1976)	-2,25	1,31			0,17				0,912
Vogeler et al. (1996)	-0,15	-0,19	0,71	-0,02					0,939
Rhoades et al. (1989)			-0,36	-0,36					0,936
Nadler et al. (1984)	-0,12	0,11			0,01				0,938
Heimovaara et al. (1995)						3,54	1,43	-0,39	0,352
Empírico (CEw, $\theta$ )	0,058	0,36	0,20						0,935

Analisando a média dos desvios percentuais entre os valores de CEa estimados pelos modelos e obtidos pela TDR (Tabela 2), verifica-se que o modelo empírico apresentou o menor desvio, entre os demais modelos, indicando, uma precisão maior na estimativa de CEa em função de CEw e  $\theta$ .

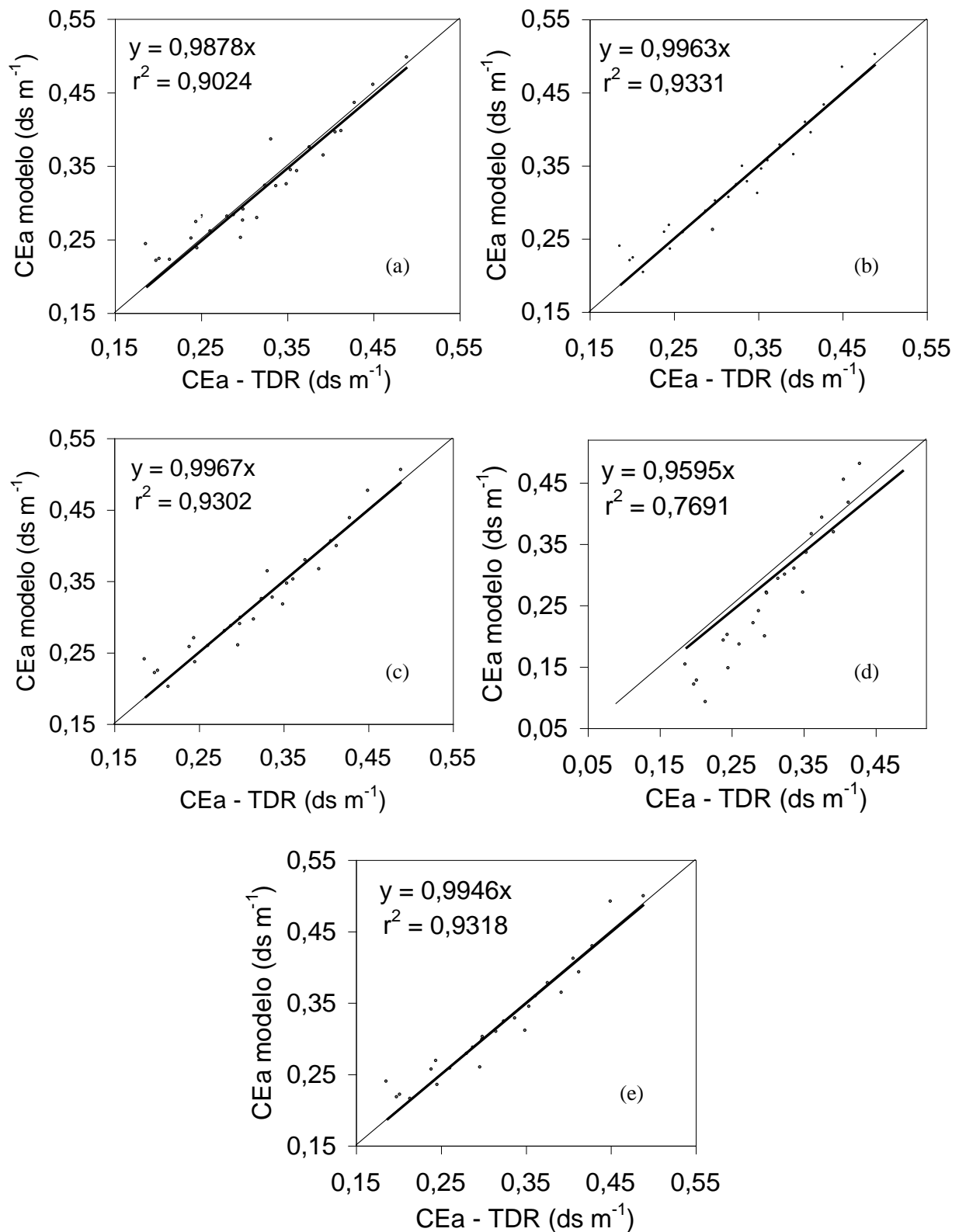
**Tabela 2.** Média dos desvios percentuais entre os valores de CEa estimados e lidos pela TDR, em condições de laboratório e campo.

Modelo	Média dos desvios percentuais	
	Laboratorio	Campo
Rhoades et al. (1976)	6,24 $\pm$ 5,70	5,47 $\pm$ 4,96
Vogeler et al. (1996)	5,10 $\pm$ 5,09	3,36 $\pm$ 2,63
Rhoades et al. (1989)	5,49 $\pm$ 5,00	6,38 $\pm$ 5,54
Nadler et al. (1984)	12,74 $\pm$ 18,94	8,90 $\pm$ 6,54
Heimovaara et al. (1995)	27,03 $\pm$ 30,37	101,16 $\pm$ 60,77
Empírico (CEw, $\theta$ )	4,88 $\pm$ 5,37	3,45 $\pm$ 2,60

Observando os valores estimados pelos modelos e os valores lidos pela TDR (Figura 2), considerando a função  $Y = AX$ , em condições de laboratório, com exceção do modelo de Heimovaara et al (1995), mais de 90% das variações observadas são explicadas pelos modelos que apresentaram boa exatidão, o que pode ser verificado pela proximidade das retas ajustadas, à reta 1:1 e pelo coeficiente angular, ou seja, quanto mais próximo a função ajustada estiver da reta 1:1, o coeficiente angular tenderá ao valor 1,0.

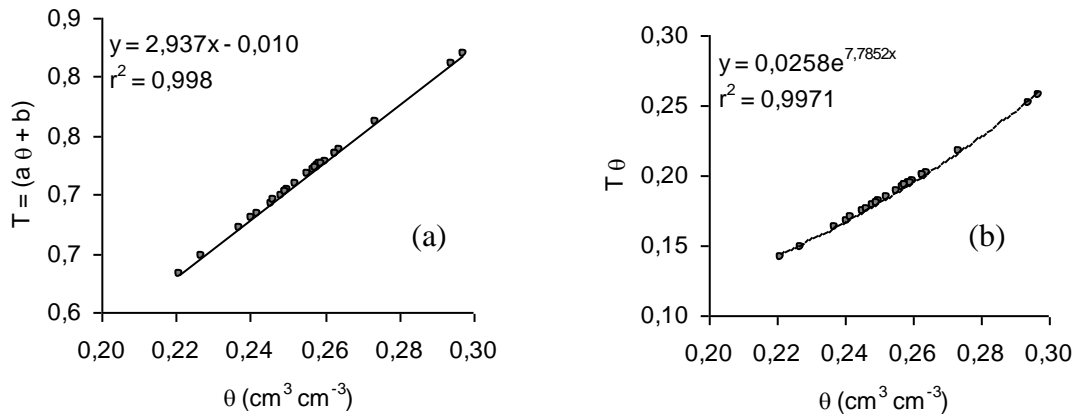
Na comparação dos valores fornecidos pelo modelo de Heimovaara et al. (1995) com os valores de CEa medidos pela TDR, verifica-se que o modelo subestima CEa, inferindo, portanto, que os outros modelos apresentaram melhor desempenho.

A Figura 3 confirma as relações lineares entre o coeficiente de transmissão (T) e o produto T versus  $\theta$  com o teor de umidade ( $\theta$ ), apresentando no ajuste das curvas, resultados semelhantes aos obtidos por Rhoades et al. (1976), ou seja, uma função linear entre T e  $\theta$  e uma função exponencial entre T $\theta$  versus  $\theta$ .



**Figura 2.** Comparação entre os valores de CEA estimados pelos modelos e medidos pela TDR, para as condições de laboratório: (a) Rhoades et al. (1976), (b) Vogeler et al. (1996), (c); Rhoades et al. (1989), (d) Heimovaara et al. (1995), (e) Empírico linear (CEw,  $\theta$ ).

Em condições de campo, os modelos de Vogeler et al. (1996) e o modelo empírico ajustado, apresentaram média dos desvios iguais a  $3,36 \pm 2,63$  e  $3,45 \pm 2,60$ , respectivamente, enquanto o modelo de Nadler et al. (1984) apresentou desvio de  $8,90 \pm 6,54$  (Tabela 2). Não foi obtido um bom ajuste para os modelos de Heimovaara et al. (1995), Rhoades et al. (1989) e Rhoades et al. (1976), com coeficientes de determinação discrepantes comparados aos demais e, portanto, baixa precisão (Tabela 3).



**Figura 3.** (a) Coeficiente de transmissão (T) em função da umidade ( $\theta$ ) e (b)  $T\theta$  em função de  $\theta$ , obtidas em laboratório.

Os modelos empírico e de Vogeler et al. (1996) apresentaram, em campo, média dos desvios inferiores as obtidas em laboratório (Tabela 2).

Comparando os valores estimados pelos modelos de Vogeler et al. (1996) e empírico com os valores medidos pela TDR, em campo, estes apresentaram coeficientes de determinação semelhantes e inferiores aos verificados para as condições em laboratório (Tabelas 1 e 3). Mesmo assim, pode-se inferir que os modelos estimam satisfatoriamente a CEa.

**Tabela 3.** Modelos matemáticos ajustados aos dados de CEw, CEa e  $\theta$ , em campo.

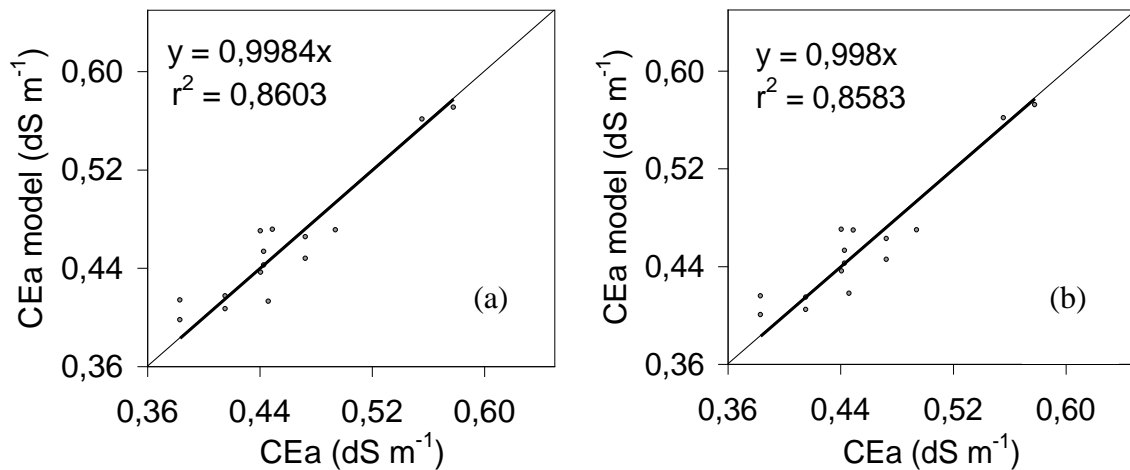
Modelo	Coeficientes								
	a	b	c	d	CEs	m	Q	$\beta$	$r^2$
Rhoades et al. (1976)	0,53	0,0			0,41				0,620
Vogeler et al. (1996)	0,54	-0,13	-0,39	-0,35					0,855
Rhoades et al (1989)	-0,28			-1,18	0,25				0,512
Nadler et al (1984)	-0,16	0,14			0,025				0,835
Heimovaara et al (1995)						1,0	2,0	-0,03	-113,0
Empírico (Cea, $\theta$ )	0,25	0,122	0,22						0,875

Os resultados dos ajustes dos dados de laboratório com o modelo de Rhoades et al. (1976) foram concordantes com os de Muñoz-Carpena et al. (2001), Wraith e Das (1998) para solos franco argiloso e franco arenoso respectivamente.

Verificou-se que em condições de campo os modelos ajustados apresentaram coeficientes angulares, dos gráficos com intercepto forçado em zero, maiores do que em laboratório, embora os coeficientes da regressão tenham-se mostrado menores (Figuras 2 e 4). Estes resultados indicam que os modelos gerados com os dados de campo são mais exatos, porém, menos precisos do que os de laboratório, o que pode ser verificado pelos menores coeficientes de determinação. Assim mesmo, a confiabilidade na explicação dos valores medidos pelos estimados com os modelos de Vogeler et al. (1996) e empírico é maior para os dados de laboratório devido ao maior número de dados coletados, do que em campo, embora não seja a razão da diferença nos valores de  $r^2$ .

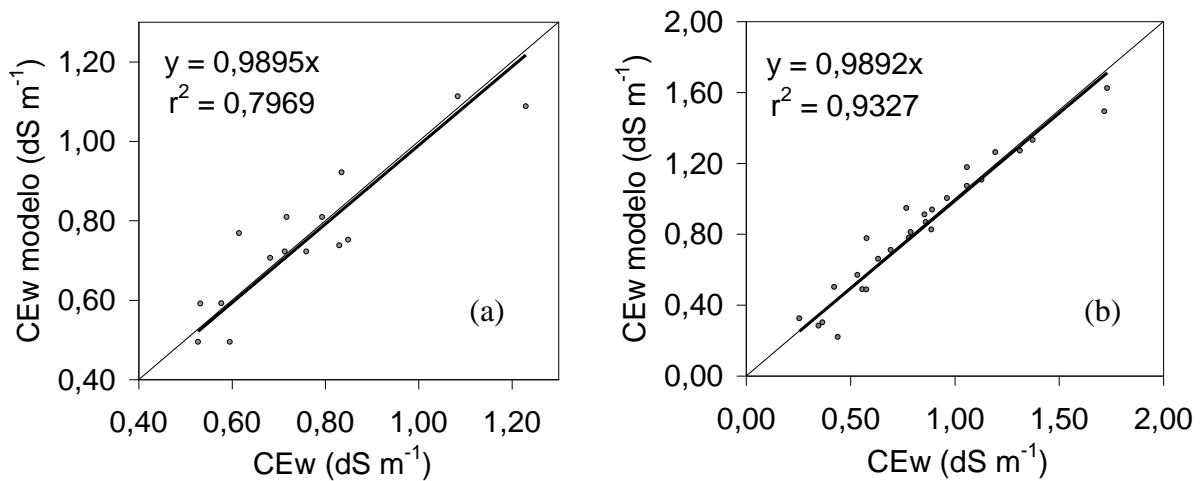


Os dados de laboratório proporcionaram melhores respostas para as parametrizações do que os dados de campo. Mesmo assim, os ajustes obtidos com os dados de campo devem ser os considerados para a estimativa de CEa e CEw, por representarem a condição real do solo em estudo.



**Figura 4.** Comparação entre os valores de CEa estimados pelos modelos e medidos pela TDR, para as condições de campo; (a) Vogeler et al. (1996), (b) Empírico linear (CEw,  $\theta$ ).

O modelo de Nadler et al. (1984), que relaciona a CEw em função de CEa e  $\theta$ , igualmente analisado (Tabelas 1, 2 e 3), apresentou melhor resultado em laboratório (Figura 5).



**Figura 5.** Comparação entre os valores de CEw estimados pelo modelo de Nadler et al. (1984) e medidos pela TDR, para as condições de (a) campo e (b) laboratório.

## 6 CONCLUSÕES

1. Em condições de campo a CEw da solução do solo pode ser monitorada a partir de leituras da TDR para fins de distribuição de solutos sob fertirrigação, com uso dos modelos de Vogeler et al. (1996), Nadler et al. (1984) e empírico;

2. O modelo de Heimovaara et al. (1995) foi o que se mostrou menos recomendado para a estimativa de CEa em condições de laboratório e campo; os demais modelos mostraram-se adequados para condições de laboratório.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HEIMOVAARA, T.J. et al. Assessing temporal variations in soil water composition with time domain reflectometry. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 59, n. 3, p.689-698, 1995.
- MALLANTS, D. et al. Comparison of the three methods of calibrate TDR for monitoring solute movement in unsaturated soil. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 60, n. 4, p. 747-754, 1996.
- MUÑOZ-CARPENA R et al. Determinación simultánea mediante tdr del transporte de agua y un soluto salino en el suelo. In: JORNADAS SOBRE INVESTIGACION EN ZONA NO SATURADA. 5., 2001, **Anais**. Pamplona: Universidade Pública de Navarra, P. 1-7, 2001.
- MUALEM, Y. FRIEDMAN, S. P., Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resource Res**, v. 27, n. 6, 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 America Journal**, Madison, v.48, n. 6, p.1258-1261, 1984.
- NISSEN, H.H.; MOLDRUP, P.; HENRIKSEN, K.; Time domain reflectometry measurements of nitrate transport in manure-amended soil. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 62, n. 1, p. 99-109, 1998.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 31, n.2, p. 213-237, 2001.
- 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 America Journal**, Madison, v.40, n. 5, p.651-655, 1976.
- RHOADES, J.D., et al. Soil electrical conductivity and salinity:new formulations and calibrations. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.53, n. 2, p.433-439, 1989.
- RISLER, P. D.; WRAITH, J. M.; GABER, H. M. Solute transport under transient flow conditions estimated using time domain reflectometry. **Soil Science Society America Journal**. Madison, v. 60, n. 5, 1297-1305, 1996.
- VAN GENUCHTEN, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**. Madison, v. 44, n. 4, p. 892-898, 1980.
- VELLAME, L. M. et al. Guias de ondas para estimativa da umidade do solo pela TDR com uso de multiplexadores. In: CONGRSSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33, Goiânia, 2003, **ANAIS**. Goiânia, SBEA, 2003, (CD ROOM).
- VOGELER, I. et al. Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 60, n. 1, p. 5-12, 1996.
- WRAITH, J.; DAS, B.S. Monitoring soil water and ionic solute distributions using time domain reflectometry. **Soil and Tillage Research**, v. 47, n. 1, p.145-150. 1998.