

ALICE LEAL TERRES ORO

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO
TEMPO PARA MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DE
UM SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração **Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente.**

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Herminia
Ferreira Tavares

CASCADEL - Paraná - Brasil

Julho - 2006

ALICE LEAL TERRES ORO

**UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DO
TEMPO PARA MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DE
UM SOLO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof^a. Dra. Simone Damasceno Gomes
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro
Setor de Ciências Exatas e Naturais, UEPG

Cascavel, 20 de julho de 2006.

A Deus, a quem agradeço todos os dias;
Ao meu esposo, Rogerio Mateus Oro, pelo apoio incondicional;
Aos meus filhos, Fernanda e Matheus Eduardo, pelo amor e carinho que
me dedicam e a alegria que transmitem;
Aos meus pais e irmãos;
Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Professora Orientadora Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares, pelos ensinamentos e pela maneira com que estes foram transmitidos, principalmente, pela paciência e companheirismo, auxílio e palavras de conforto e estímulo, nas horas difíceis;

À Professora Doutoranda Rosangela Villwock, pela colaboração na etapa de calibração das sondas;

Ao Prof. Dr. Reginaldo Ferreira Santos pelo fornecimento de material de apoio;

Ao CNPq, Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento do Projeto de Pesquisa;

À Fundação Banco do Brasil pelo auxílio que possibilitou a aquisição do equipamento TDR;

À minha amiga, Janete Terezinha Chimbiba, pela colaboração no desenvolvimento de algumas técnicas;

Aos professores do Curso de Pós-Graduação, pela oportunidade oferecida;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela oportunidade de realização deste curso.

SUMARIO

LISTA DE TABELAS.....	<i>vii</i>
LISTA DE FIGURAS.....	<i>ix</i>
RESUMO.....	<i>Xii</i>
SUMMARY.....	<i>xiii</i>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Processo de Calibração	4
2.1.1 Constituição do solo.....	4
2.1.2 Solos afetados por sais.....	5
2.1.3 Como um solo se torna salino.....	7
2.1.4 Recuperação dos solos afetados por sais.....	7
2.1.5 Recuperação de solo salino-sódico.....	8
2.1.6 Recuperação de solo sódico.....	8
2.1.7 Dinâmica da água e solutos no solo.....	8
2.2 Condutividade elétrica.....	10
2.3 Determinação da umidade no solo.....	11
2.4 Reflectometria no Domínio do Tempo.....	12
2.4.1 Medidas da Condutividade Elétrica usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Captura dos dados.....	23
3.2 Coleta do solo.....	24
3.3 Confecção e calibração das sondas.....	25
3.4 Determinação da impedância das sonda (Z_0).....	29
3.5 Preparo das soluções salinas.....	31
3.6 Preparação das amostras de solo contaminado.....	31
3.7 Leitura do sinal eletromagnético da sonda no ar e em curto circuito.....	32
3.8 Determinação da condutividade elétrica das soluções através do sinal eletromagnético captado pela TDR.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34

4.1.	Resultados obtidos com o emprego do programa INFOSYS-TDR.....	34
4.2	Montagem e calibração das sondas.....	36
4.3	Impedâncias características das sondas.....	38
4.4	Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 16, para as soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.....	39
4.5	Determinação da condutividade elétrica (CE) usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann para a sonda 16.....	41
4.6	Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 18, para as soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.....	42
4.7	Determinação da condutividade elétrica (CE) usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese -Tiemann para a sonda 18.....	44
4.8	Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 19, para as soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.....	45
4.9	Resultados das determinações de condutividade elétrica de soluções pelo equipamento TDR, através da equação de Giese-Tiemann, com a sonda 19.....	47
4.10	Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 16, no solo contaminado com soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.....	48
4.11	Determinação da condutividade elétrica (CE) usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann, para o solo contaminado com os diferentes teores salinos nas soluções, sonda 16.....	50
4.12	Leituras obtidas pelo equipamento TDR, através da sonda 18, no solo contaminado com soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.....	51

4.13	Determinação da condutividade elétrica usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann, para o solo contaminado com os diferentes teores salinos nas soluções, sonda 18.....	53
4.14	Leituras obtidas pelo equipamento TDR, através da sonda 19, no solo contaminado com soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.....	54
4.15	Determinação da condutividade elétrica usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann, para o solo contaminado com os diferentes teores salinos nas soluções, sonda 19.....	56
5	CONCLUSÕES.....	58
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
7	ANEXOS.....	65
ANEXO A	Valores da constante dielétrica aparente (K_a) lidas pelo equipamento TDR, durante a etapa de calibração das sondas.....	66
ANEXO B	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas coluna 1.....	67
ANEXO C	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas coluna 2.....	67
ANEXO D	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas coluna 3.....	68
ANEXO E	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas coluna 4.....	68
ANEXO F	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas coluna 5.....	69
ANEXO G	Determinação da Condutividade Elétrica do Solo.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Classificação dos solos afetados por sais.....	5
Tabela 2.	Permissividade relativa de alguns materiais constituintes do solo.....	14
Tabela 3.	Equações utilizadas para calcular a C_e total do solo.....	20
Tabela 4.	Características físicas do solo utilizado.....	25
Tabela 5.	Análise química do solo do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná.....	25
Tabela 6	Impedância característica das sondas.....	38
Tabela 7.	Cálculo da Condutividade Elétrica das Soluções com diferentes níveis de cloreto de sódio, com o emprego da sonda 16.....	41
Tabela 8.	Cálculo da Condutividade Elétrica das Soluções com diferentes níveis de cloreto de sódio, através da sonda 18.....	44
Tabela 9.	Cálculo da Condutividade Elétrica das Soluções com diferentes níveis de cloreto de sódio, sonda 19.....	47
Tabela 10.	Cálculo da Condutividade Elétrica do Solo contaminado com os diferentes níveis de cloreto de sódio, sonda 16.....	50
Tabela 11.	Determinação da condutividade elétrica do solo contaminado com os diferentes níveis de cloreto de sódio, sonda 18.....	53
Tabela 12.	Cálculo da Condutividade Elétrica do Solo contaminado com os diferentes níveis de NaCl, sonda 19.....	57
Tabela 13.	Valores da constante dielétrica aparente (K_a) lidas pelo equipamento TDR, durante a etapa de calibração das sondas.....	66
Tabela 14.	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 1.....	67
Tabela 15.	Valores de K_a , lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 2.....	67

Tabela 16.	Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 3.....	68
Tabela 17.	Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 4.....	68
Tabela 18.	Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 5.....	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema do experimento.....	14
Figura 2	Circuito distribuído.....	18
Figura 3	Circuito agrupado.....	18
Figura 4	Diagrama estrutural de uma sonda TDR.....	26
Figura 5	Coluna de solo em processo de saturação.....	28
Figura 6	Esquema representativo da disposição simétrica das sondas na coluna de PVC, durante a calibração.....	28
Figura 7	Sondas TDR durante o período do experimento.....	28
Figura 8	Esquema para encontrar V_0 , V_1 e $V_{inf.}$, em um gráfico obtido com uma sonda mergulhada em água destilada a 20 C°.....	30
Figura 9	Determinação dos valores de V_0 e de $V_{inf.}$	31
Figura 10	Esquema da leitura do sinal eletromagnético no ar.....	32
Figura 11	Esquema representativo da leitura do sinal eletromagnético com a sonda em curto circuito.....	33
Figura 12	Tela mostrando a recuperação de dados armazenados em banco de dados, através do programa INFO-SYS TDR.....	34
Figura 13	Tela mostrando registro de dados e gráfico, obtidos através do programa INFO-SYS TDR.....	35
Figura 14	Sonda já montada.....	36
Figura 15	Correlação entre umidade volumétrica (UV) e a constante dielétrica aparente (K_a), lida no solo durante a calibração da sonda 16.....	37
Figura 16	Correlação entre umidade volumétrica (UV) e a constante dielétrica aparente (K_a), lida no solo durante a calibração da sonda 18.....	37

Figura 17	Correlação entre umidade volumétrica (UV) e a constante dielétrica aparente (Ka), lida no solo durante a calibração da sonda 19.....	37
Figura 18	Correlação entre Ka e umidade volumétrica, com dados de todas as sondas.....	38
Figura 19	Forma da função de onda no ar e em curto-circuito para a sonda 16.....	39
Figura 20	Formas da função de onda obtida através da sonda 16 no ar, em curto-circuito e em soluções de diferentes concentrações.....	40
Figura 21	Análise de regressão para os valores obtidos através do condutivímetro e os valores calculados.....	41
Figura 22	Sinal de pulso eletromagnético emitido pela TDR sonda 18, leitura obtida no ar e em curto.....	42
Figura 23	Resultados obtidos através da sonda 18 para soluções de diferentes concentrações.....	43
Figura 24	Análise de regressão para os valores obtidos através do condutivímetro e os valores calculados, considerando a sonda 18.	44
Figura 25	Sinal de pulso eletromagnético emitido pela TDR sonda 19, leitura obtida no ar e em curto circuito.....	45
Figura 26	Resultados obtidos através da sonda 19 para soluções de diferentes concentrações.....	46
Figura 27	Análise de regressão para os valores de Ce obtidos através do condutivímetro e os valores calculados, sonda 19.....	47
Figura 28	Resultados obtidos através da sonda 16 para o solo contaminado com as soluções de diferentes concentrações.....	49
Figura 29	Análise de regressão para os valores lidos através do condutivímetro e os lidos com a TDR, para sonda 16.....	51

Figura 30	Resultados obtidos através da sonda 18 para o solo contaminado com as soluções de diferentes concentrações.....	52
Figura 31	Análise de regressão para os valores lidos através do condutivímetro e os lidos com a TDR, para sonda 18.....	54
Figura 32	Resultados obtidos através da sonda 19 para o solo contaminado com as soluções de diferentes concentrações.....	55
Figura 33	Análise de regressão para os valores lidos através do condutivímetro e através do equipamento TDR, com a sonda 19.....	57

RESUMO

Medidas de concentrações de solutos em solos são essenciais para otimizar a irrigação e aplicações de fertilizantes, para estudar escoamento superficial e erosão e para avaliar a salinidade do solo. Para tal fim, a Reflectometria no Domínio do Tempo é uma técnica dielétrica que tem sido capaz de fornecer valores precisos, tanto para teores de água como para condutividade elétrica do solo. Empregada tanto em condições de laboratório como em condições de campo, esta técnica não-destrutiva realiza medidas simultâneas das duas grandezas, empregando uma única sonda e testando a mesma região da amostra. Embora existam várias técnicas através das quais a condutividade elétrica pode ser determinada com um equipamento de Reflectometria no Domínio do Tempo, poucas técnicas são caracterizadas pela simplicidade e pela rapidez. Devido a isso, o presente trabalho objetivou avaliar diferentes métodos para a determinação da condutividade elétrica de soluções e de solos. O trabalho foi desenvolvido em condições de laboratório, usando amostras deformadas de um Latossolo Vermelho distroférico da Região Oeste do Paraná, acondicionadas em colunas com comprimento de 0,30 m e diâmetro de 0,19 m. As sondas com 3 hastes, montadas de forma artesanal e sem qualquer equalização de impedâncias, foram instaladas verticalmente nas colunas de solo, sendo considerada como controle a coluna cujo solo recebeu água destilada. Os outros tratamentos foram definidos conforme os teores de cloreto de sódio adicionado: 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09; 0,10 e 0,15 N. A condutividade elétrica foi determinada a partir das formas de onda coletadas com um programa específico e não ocorreu atenuação de sinal. Encontrou-se uma relação linear entre as medidas de condutividade elétrica total do solo e a condutividade elétrica da solução do solo, sob umidade constante. Também se concluiu que solos com alto teor de Fe exibem um comportamento dielétrico atípico, o qual limita a aplicabilidade da técnica.

Palavras-chave: calibração, propriedades dielétricas, condutividade elétrica, fertirrigação, transporte de solutos, modelos TDR.

SUMMARY

USE OF THE TIME DOMAIN REFLECTOMETRY TECHNIQUE FOR SOIL BULK ELECTRICAL CONDUCTIVITY MEASUREMENTS

Measurements of solute concentrations at soils are essential to optimize irrigation and fertilizer application, to study surface runoff and erosion and to evaluate soil salinity. For this purpose, Time Domain Reflectometry is a dielectric technique that has been shown to give accurate water content and electrical conductivity values. Used under both laboratory and field conditions, this a non-destructive essay takes simultaneous measurements of electrical conductivity and soil water content, using a single probe and testing only one sample region. Although there are many ways in which electrical conductivity may be obtained with Time Domain Reflectometry equipment, few of them are characterized by simplicity and straight forwardness. Because of that, this study aimed to evaluate different methods to determine electrical conductivity at solutions and soils. A sequence of laboratory experiments was conducted in deformed soil samples of an Oxisol from West Parana State, arranged in columns 0,30 m height, with an internal diameter of 0,19 m. The three – wire probes, with manual assembling and without impedance-matching transformer, were vertically installed in soil columns, considering as a control one the column which soil received only distilled water. The others treatments were defined according to the sodium chloride content: 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09; 0,10 and 0,15 N. The electrical conductivity was determined using waveforms collected with specific software and there wasn't signal attenuation. It was found a linear relationship between the bulk electrical conductivity and the pore water electrical conductivity under constant water content. It was concluded that soils with significant iron contents display an atypical dielectric behavior that limits the applicability of the equipment for measuring not only soil moisture but bulk electrical conductivity also.

Keywords: calibration, dieletrical properties, electrical conductivity, fertigation, solute transport, TDR models.

1 INTRODUÇÃO

A salinização do solo representa um grave problema para a agricultura mundial, principalmente quando se trata de agricultura irrigada, na qual a fertirrigação, agente facilitador da fertilização e irrigação, pode provocar a salinização do solo. A salinização também pode ocorrer pela elevação do lençol freático ou sob condições de evapotranspiração superior a infiltração, devido à drenagem deficiente do solo (QUEIROZ, 2004).

O processo de salinização do solo pode ter, também, causas naturais, as quais podem ser decomposição dos minerais primários, águas subsuperficiais ricas em sais solúveis associados a uma drenagem deficiente, má permeabilidade do solo ou por alagamento de águas marinhas. Os maiores problemas de solos salinos são encontrados nas regiões áridas e semi-áridas, mas também pode ocorrer em planícies férteis de bacias de rios, pela elevação do lençol freático.

O desenvolvimento das plantas requer um sistema radicular bem desenvolvido, com suprimento adequado de oxigênio pelo solo. Nesse caso, é essencial que as fases líquida e gasosa sejam adequadas. Para se ter bons resultados em uma cultura, é necessário que se conheça todos os processos de transporte que ocorrem no solo. Com este conhecimento, é possível melhorar a fertilidade do solo, bem como realizar a prevenção da salinidade do solo.

Historicamente, a salinidade do solo influenciou a evolução de civilizações agrárias antigas: os Maias e Sumérios possuíam culturas extremamente produtivas, mas com o passar dos anos, o manejo inadequado da irrigação tornou esses solos totalmente improdutivos (JORNAL DO MEIO AMBIENTE, 2002). No Brasil, a Ilha de Assunção, no município de Cabrobó, é o retrato da desertificação em Pernambuco. Com solos ricos em nutrientes, o que fazia dela uma das áreas mais férteis da região, possui hoje um terço dos seus cinco mil hectares imprestáveis para a agricultura. Estima-se que cerca de 50% das áreas irrigadas do mundo estejam afetadas por sais (SANTOS et al., 2005).

Os principais parâmetros utilizados para caracterizar os solos afetados por sais são a condutividade elétrica, o pH e o teor de sódio trocável.

A condutividade elétrica pode ser medida através de um condutímetro e neste trabalho, foi utilizado um equipamento TDR (Time Domain Reflectometry) para medir os teores de solutos no solo.

Nesse sentido, a utilização do equipamento para determinação da umidade do solo em campo e em laboratório possui algumas vantagens, tais como: é um método que possui alta precisão, é possível efetuar várias leituras no mesmo local sem deformar a amostra do solo, oferecendo segurança ao usuário. O TDR tem seu funcionamento baseado no efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação de pulsos de microondas em cabos condutores colocados em contato com o solo. Este fenômeno se deve à diferença entre as constantes dielétricas K_a da água, do ar e dos materiais constituintes do solo. O valor da constante dielétrica varia de 1 até 80, no ar tem valor mínimo igual a 1, na água possui um valor máximo igual a 80 e nas partículas sólidas do solo possuem um valor entre 3 e 12.

A constante dielétrica da água é tão alta, em relação aos outros materiais constituintes do solo, que é a que determina o valor da constante dielétrica aparente (K_a), sendo a constante medida no sistema ar-solo-água. Conhecendo-se essa variável, a umidade volumétrica do solo pode ser estimada através de calibrações obtidas em campo ou em laboratório. Por ser grande a diferença entre a constante dielétrica da água e de outros materiais constituintes do solo, a velocidade de um pulso de microonda em uma linha de transmissão paralela enterrada no solo é muito dependente do índice de água no solo. Quando um pulso de microonda viaja através da linha de transmissão comporta-se como um feixe de luz. Descontinuidades na linha de transmissão e material circunvizinho fazem alguma microonda ser refletida através da linha.

Já, o tempo de trânsito é definido como o tempo requerido para o pulso viajar em um sentido de uma extremidade a outra da sonda. Se o solo estiver

completamente seco, a constante K_a varia de 2 a 4, se 25% do volume do solo for água, a constante K_a será aproximadamente entre 11 e 12. Para solos agricultáveis, o valor de K_a depende do índice do volume de água no solo e, é na maior parte das situações independente do tipo de solo. A relação entre K_a e a porcentagem volumétrica da água no solo foi estabelecida através de medidas cuidadosas de K_a , nas seqüências de testes preparados com volumes exatamente conhecidos de água no solo. Esta relação é usada então para converter automaticamente medidas de campo de K_a no índice volumétrico de água no solo (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP, 1996).

Por outro lado, a versatilidade do equipamento TDR passou a ser mais explorada nos últimos dez anos, chegando a ser empregada em áreas extensas, com grande número de unidades (RUDOLPH et al., 1996): cento e sessenta e oito guias, instaladas em seis profundidades diferentes, forneceram um rico conjunto de dados espaciais e temporais tanto para fluxo como para transporte de solutos, tendo sido usado como traçador o NaCl.

Neste trabalho, confeccionou-se 20 sondas TDR com materiais nacionais. Elas foram calibradas para, posteriormente, estimar medidas de solutos no solo, utilizando a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR). Foi determinada a condutividade elétrica (C_e), no solo contaminado com soluto, em condições de laboratório, com um equipamento TDR-Trase System I 6050X1.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Processo de Calibração

O surgimento de novos métodos e novos equipamentos para medição requer que se verifique a correspondência de suas medidas com aquelas consideradas como referência; quer sejam tradicionais, alternativas ou novas. Os equipamentos e métodos de mensuração, para uso com segurança e confiabilidade mínima, devem passar pelo processo denominado calibração (CICHOTA, 2003).

Ainda segundo CICHOTA (2003), o processo de calibração consiste na coleta de dados do aparelho ou sistema a ser calibrado, da coleta dos valores de referência e da análise da relação entre ambas. Essa análise fornece a relação matemática ou estatística entre os valores de referência e a do dispositivo a ser calibrado e a estimativa dos erros de medição.

2.1.1 Constituição do solo

O solo é um material poroso, constituído de fase sólida, líquida e gasosa, que cobre parte da superfície terrestre. É originado, principalmente, de rochas por processos de intemperização. Esse material poroso, de características peculiares, serve de apoio para o desenvolvimento da maioria dos vegetais: apoio físico (sustentação), químico e biológico (nutrição). Uma das suas funções mais importantes é a de operar como um reservatório para a água, substância essencial para o desenvolvimento de culturas agrícolas.

Qualquer cultura, durante seu ciclo de desenvolvimento, consome um enorme volume de água, sendo que cerca de 98% deste volume apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. Este fluxo de água é, porém, necessário para o desenvolvimento vegetal e por este motivo sua taxa deve ser mantida dentro de limites ótimos para cada cultura (MEURER, 2000).

2.1.2 Solos afetados por sais

Os solos afetados por sais podem ser classificados como salinos (apresentam altas concentrações de sais solúveis), sódicos (com altas concentrações de sódio trocável) e salino-sódico (possui altas concentrações de sais e de sódio trocável). Estima-se que esses solos compreendam cerca de 10% do total da área de solos cultiváveis no mundo (MEURER, 2000).

Os solos afetados por sais ocorrem em muitos países dos hemisférios norte e sul. No Brasil, ocupam área significativa na Região Nordeste, ocorrendo também em áreas restritas de outros estados (BARROS et al., 2004). Os íons mais comuns em solos salinos são os cátions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , e os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , formando sais como cloretos, sulfatos, nitratos, carbonatos e bicarbonatos, os quais bastante solúveis. A salinidade do solo pode ocorrer através de: material de origem, ausência ou escassez de chuvas

nas regiões de clima árido ou semi-árido, onde não ocorrem precipitações suficientes para percolar os sais solúveis no solo que estão acumulados, alta evapotranspiração, salinização pela água do mar, ascensão do lençol freático e água de irrigação inadequada, entre outros (MEURER, 2000).

A Tabela 1 mostra classificação de solos conforme o valor da condutividade elétrica (Ce), pH, percentagem de sódio trocável (PST) e a relação de absorção de sódio (RAS).

Tabela 1 Classificação dos solos afetados por sais

Classificação	Ce dSm ⁻¹	pH	PST %	RAS %
Normal	<4	<8,5	<15	<13
Salino	>4	< 8,5	< 15	<13
Sódico	<4	> 8,5	> 15	>13
Salino-sódico	>4	< 8,5	> 15	>13

Fonte: Sparks, (1995), citado por MEURER, (2000).

Calculo do RAS

$$RAS = \frac{N^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{++} + Mg^{++})}{2}}} \quad (01)$$

Ce = medida com condutivimetro a partir do extrato de saturação

pH = Acidez do solo medida com peagâmetro ou outro método

RAS = relação de absorção de sódio

PST = percentagem de sódio trocável

Cálculo da PST

$$\text{PST} = \frac{\text{sódio trocável (mE/100gdesolo)}}{\text{Capacidade de troca de Cátions(C T C)}} \times 100 \quad (02)$$

Nos solos salinos, o crescimento das plantas é limitado. Devido à alta concentração de sais, os solos se tornam floculados, são permeáveis e apresentam problemas de natureza física.

Esses solos podem ser recuperados pela percolação de água de boa qualidade (baixa condutividade elétrica de eletrólitos) no perfil. A eficiência deste processo pode ser limitada por fatores, como baixa condutividade hidráulica do solo e drenagem deficiente. Os solos sódicos possuem um alto teor de Na, causando problemas químicos e físicos, além de limitar o crescimento das plantas. O excesso de sódio no solo provoca a dispersão da argila e, quando o teor é muito alto, pode ocorrer também a dispersão da matéria orgânica. Os solos salinos-sódicos apresentam características semelhantes as dos solos salinos, porém possuem maior concentração de sódio. Ocorre predominância de cátions divalentes e apresentam boa estrutura física e alta permeabilidade. A recuperação desses solos envolve a combinação das práticas recomendadas para os solos salinos e sódicos (EMBRAPA, 2001; MEURER, 2000).

2.1.3 Como um solo se torna salino

A água da chuva que cai quase pura penetra no solo, solubiliza e arrasta consigo íons de Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , bem como radicais CO_3^- , HCO_3^- ,

SO_4^- e outros, transformando-os em uma solução, que flui para formar rios e lagos.

Ao se irrigar um solo de drenabilidade deficiente a nula, situado em região de baixas precipitações médias anuais e alto déficit hídrico, ele se torna salino em um período de tempo bastante curto, porque as plantas removem basicamente a água do solo, enquanto que a maior parte dos sais fica retida. Nessas condições, o solo tende a se tornar salino, caso não seja drenado artificialmente, o que vem ocorrendo nas regiões semi-áridas do nordeste brasileiro (EMBRAPA, 2001).

Os sais do solo e da água reduzem a disponibilidade de água para as plantas a tal ponto, que afetam o rendimento das culturas. Plantas muito sensíveis à salinidade absorvem água do solo, juntamente com os sais, possibilitando a toxidez pelo excesso de sal absorvido. Tal excesso promove desequilíbrios no citoplasma, fazendo com que os danos apareçam principalmente nas bordas e nos ápices das folhas, regiões onde ocorre o acúmulo dos sais, Lima (1997) citado por MELLONI (2000).

A salinidade afeta praticamente todos os processos fisiológicos e metabólicos das plantas, além de aumentar o déficit hídrico, sendo freqüentemente proporcional ao potencial osmótico da solução do solo (QUEIROZ, 2004).

2.1.4 Recuperação dos solos afetados por sais

Para se recuperar um solo salino, primeiro devem-se descobrir os níveis de salinidade presente no solo, para posteriormente ser instalado um sistema que possibilite a recuperação do solo; por exemplo, um sistema de drenagem subterrâneo e deixar que o solo se recupere naturalmente pela lavagem

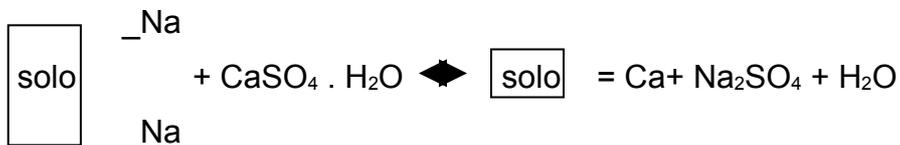
causada pelas águas das chuvas, ou, ainda, lavá-lo com água de boa qualidade, com baixos teores de sais.

2.1.5 Recuperação de solo salino-sódico

Os solos salino-sódicos possuem estrutura semelhante a dos solos salinos. Nesses solos, o excesso de sais não pode ser lavado, pois a porcentagem de sódio trocável aumentará e, como consequência, ele passará a ser sódico, tendo sua estrutura destruída. Então, se deve adicionar cálcio ao solo, com a finalidade de substituir o sódio e efetuar a lavagem do solo.

2.1.6 Recuperação de solo sódico

Os solos sódicos e salino-sódicos podem ser melhorados aplicando-se gesso agrícola ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sendo que a recuperação desses solos está baseada na seguinte reação:



Nessa reação há formação de sulfato de sódio, o qual deve ser removido com água de boa qualidade (EMBRAPA, 2001).

2.1.7 Dinâmica da água e solutos no solo

A água é extremamente importante para os vegetais e seu manejo adequado é decisivo para o desenvolvimento e produção das plantas, evitando

sua falta ou excesso. Dessa forma, o conhecimento da distribuição da quantidade de água no solo e sua qualidade torna-se necessário para evitar um processo de salinização no solo. Portanto, esses são alguns dos fatores indispensáveis para a existência de uma agricultura sustentável e sem prejuízos ao meio ambiente.

O conteúdo de água no solo é um de seus atributos mais importantes, e um dos mais variáveis. O deslocamento e reciclagem de vários elementos químicos, o desenvolvimento dos processos bioquímicos do solo, o crescimento das plantas e uma série de outras propriedades físicas do próprio solo como densidade, resistência à penetração, tensão de cisalhamento, etc., são significativamente influenciadas pelo seu teor de água. Sua quantificação é, portanto, de grande relevância para um amplo conjunto de disciplinas.

A água no solo pode apresentar-se fortemente presa às superfícies dos sólidos ou em poros microscópicos, ou até praticamente livre de interações com os sólidos, nos macroporos. A faixa entre a quantidade de água que é retida pelo solo por no mínimo alguns dias, contra a força gravitacional e aquela em que as plantas ainda conseguem extrair-la do solo contra as forças capilares é, em geral, a de maior interesse para as pesquisas agrônômicas e onde os equipamentos de quantificação da água do solo devem atuar com mais eficiência. Quanto maior a faixa de uso de um aparelho, de melhor qualidade ele será considerado (CICHOTA, 2003).

A água presente no solo constitui sua fase líquida, nunca é quimicamente pura. A quantidade de sais dissolvidos varia consideravelmente e depende de uma série de fatores, tais como: precipitação, natureza do solo e da rocha, temperatura da água e atividade humana. A concentração de sais encontrada na solução do solo, geralmente inicia com menos de 0,0050% na água de chuva, ou mais de 0,10% na água de irrigação, chegando a atingir valores de 1% na água de drenagem de solos moderadamente salinos, ou até 3% em solos severamente salinizados. Os íons mais freqüentemente

encontrados são os cátions de sódio, cálcio, magnésio, amônio, ferro na forma reduzida e, ainda, ânions como cloro, bicarbonato, carbonato, sulfato, nitrato e fosfato (PREVEDELLO, 1996).

Quando a água se movimenta no solo, ela arrasta os solutos pelo fluxo de massa, sendo uma parte absorvida pelas plantas, ou podendo ser precipitada, quando sua concentração excede sua solubilidade, como acontece na superfície do solo durante a evaporação. Os solutos não se movem somente com a água; eles também podem se dispersar, no solo, em resposta a gradientes de concentração. Os solutos também reagem entre si e interagem com a matriz do solo numa sucessão cíclica contínua de processos físicos e químicos inter-relacionados.

Essas interações são envolvidas e são geralmente influenciadas por de fatores como acidez, temperatura, potencial de óxido-redução, composição e concentração da solução do solo. Também não se pode desconsiderar que determinados solutos podem sofrer transformações biológicas pela fauna e flora (PREVEDELLO, 1996). Segundo o mesmo autor, o soluto movimenta-se dentro de um meio poroso convectivamente (fluxo de massa) e por dispersão e, também, está sujeito a outros processos de perdas e ganhos, como o de sorção (adsorção e dessorção) e o de transformações químicas (solubilização, insolubilização) ou biológicas.

2.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma expressão numérica da habilidade inerente de um meio em conduzir uma corrente elétrica, estando correlacionada à concentração total de eletrólitos dissolvidos (íons) em solução, uma vez que somente a água por si só é má condutora de corrente elétrica, e o uso da água é comum para expressar a concentração total de sais

dissolvidos numa amostra aquosa (QUEIROZ, 2004). A condutividade elétrica (Ce) é um parâmetro muito utilizado para medir o nível de salinidade do solo ou da água de irrigação, sendo expressa em deciSiemens por metro (dS/m), milimhos por centímetros (mmhos/cm), microSiemens por centímetro (μ S/cm) ou Siemens por metro (S/m).

O conhecimento da condutividade elétrica e da composição química da solução do solo é importante para determinar a salinidade e a presença de íons tóxicos, durante o ciclo de uma cultura. Os métodos mais usados para determinar a salinidade do solo são: as soluções diluídas (solo, água) e extrato de saturação (BLANCO et al., 2000). Entretanto, entre os vários métodos propostos para as medidas de salinidade do solo, somente métodos elétricos baseados na condutividade elétrica do volume do solo parecem práticos (MALICKI & WALCZAK, 1999). A concentração de sais solúveis do extrato de saturação tende a ser aproximadamente igual à metade da concentração da solução do solo no seu limite máximo de retenção de umidade na capacidade de campo e aproximadamente igual à quarta parte da concentração no limite inferior de umidade U.S.S.L.S. (1954), citado por QUEIROZ (2004).

Além dos métodos laboratoriais, métodos de campo podem ser utilizados para determinar a salinidade do solo. Os métodos laboratoriais são mais precisos, porém demandam mais tempo e por isso limitam o número de determinações. Outras metodologias estão sendo utilizadas na determinação da condutividade elétrica. Em condições de campo, destacam-se os equipamentos munidos de sensores que são capazes de medir a condutividade elétrica total do solo, dentre eles se sobressai o TDR (Time Domain Reflectometry), por permitir grande número de leituras simultâneas e fácil operação (MALICKI & WALCZAK, 1999; MOJID & MALICKI, 1999; TEIXEIRA et al., 2003).

2.3 Determinação da umidade no solo

Diversos são os métodos para determinação do teor de água (umidade) no solo, tais como: método gravimétrico, termalização de nêutrons, resistência elétrica, bloco de gesso e Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

O método gravimétrico ou direto é considerado como o método padrão, pois além de apresentar resultados precisos em experimentos laboratoriais, possui um custo relativamente baixo. Quanto à sonda de nêutrons exige um bom treinamento para seu manuseio, por causa da presença de fontes radioativas. Já, o bloco de gesso é um instrumento simples e de baixo custo, mas, com o passar do tempo, o elemento sensor sofre deterioração devido à interação com os compostos físico-químicos do solo (COELHO & OR, 1996).

O método gravimétrico, tomado como padrão, baseia-se na pesagem de amostras de solo úmido e depois de secos em estufa. A diferença entre as duas medidas representa a massa de água presente naquela amostra. Este método é simples e barato, além de ser bastante preciso, sendo este o motivo principal pelo qual é considerado como método de referência. Mas este método é muito trabalhoso, demanda bastante tempo, desde a coleta das amostras, até a obtenção do resultado, além de ser um método destrutivo e não automatizado, pois as amostras devem ser retiradas do campo e levadas até o laboratório, impossibilitando repetições em um mesmo ponto.

Os métodos indiretos utilizam uma propriedade física do solo que é dependente da quantidade de água presente nele. Existem muitos processos e equipamentos que permitem a determinação indireta do conteúdo de água presente no solo, tais como: os métodos elétricos baseados na resistência ou capacitância do solo, os métodos térmicos baseados na condutividade térmica do solo, os métodos radioativos (moderação de nêutrons rápidos ou interação de raios gama) que exigem pessoal qualificado pois empregam material radioativo, a tensiometria, baseada no potencial matricial, amplamente utilizada

para fins práticos e a reflectometria no domínio do tempo, baseada na constante dielétrica dos materiais constituintes do solo, entre outros.

A maior vantagem na utilização dos métodos indiretos e não destrutivos reside no fato de se realizar várias repetições em um mesmo ponto, pois após a instalação poderão ser feitas várias leituras em um mesmo local, não havendo a necessidade de revolvimento do solo.

2.4 Reflectometria no Domínio do Tempo

Nos últimos quinze anos, a técnica de monitoramento através do TDR (Time Domain Reflectometry) tem recebido destaque para obtenção da umidade e o transporte de solutos no solo. Essa técnica possibilita também medidas diretas e não destrutivas com a vantagem de não apresentar riscos ao operador do equipamento (TOMMASELLI, 1997; LEE et al., 2001; TRINTINALHA, 2000; TOPP et al., 1980). Entretanto, apresenta como desvantagens a dependência do tipo de solo (orgânico ou mineral), dos materiais magnéticos presentes no solo, o custo elevado do aparelho e calibração trabalhosa (TOMMASELLI, 1997). Segundo SOUZA et al. (2001), a presença de óxidos de ferro e a densidade do solo influenciam nas medidas.

Esse método baseia-se na velocidade de propagação de microondas em cabos condutores, em função da umidade do solo que os circundam, considerando-se que as constantes dielétricas dos componentes do solo são bastante inferiores à constante dielétrica da água. Qualquer material, sendo puro ou composto, poderá ser descrito ou caracterizado por algumas de suas grandezas físicas, podendo ser massa, volume, temperatura, umidade, etc. Dessa maneira, o comportamento dielétrico de um dado material pode ser caracterizado pela sua permissividade (ϵ , expressa em Fm^{-1}), mais comumente descrita como permissividade relativa, a constante dielétrica (K) é a razão da

permissividade do material pela do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$), conforme equação 3. A permissividade relativa indica em quanto aumenta a capacitância de um capacitor ao substituir o vácuo como meio dielétrico pelo material em questão (TOMMASELLI, 1997). Como desvantagens quanto ao uso da TDR para estimar quantidade de água presente no solo, pode-se citar o seu alto custo, a complexa calibração e a existência de alguns erros inerentes à própria técnica, sendo que esses fatores têm limitado sua utilização no campo (SOUZA et al.,2002; TOMMASELLI, 1997; COELHO, 2003).

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (03)$$

A medida da constante dielétrica dos materiais teve início no começo do século XX; inicialmente, nas pesquisas físicas e químicas e, posteriormente, em disciplinas na área da Engenharia e Eletrônica, como em testadores de cabos eletrônicos. Investigações feitas sobre a interação da transmissão de ondas de rádio e o meio ambiente mostraram as primeiras relações entre os vários materiais e a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. No solo, estudou-se o comportamento destas transmissões e a sua relação com a umidade, temperatura e conteúdo de sal nos solos, inclusive com a variação das frequências utilizadas. Desses estudos, surgiram as primeiras iniciativas de utilizar a medição da constante dielétrica para a determinação da umidade em meios porosos, conforme Fletcher (1939) citado por CICHOTA (2003).

A Tabela 2 mostra valores da permissividade relativa (constante dielétrica K_a) de alguns materiais, onde se observa a grande diferença da permissividade da água em relação aos outros materiais constituintes do solo, fazendo com que a permissividade relativa aparente do solo seja definida basicamente pelo seu conteúdo de água.

A Tabela 2 mostra o valor da permissividade relativa de cada material.

Tabela 2 Permissividade relativa de alguns materiais constituintes do solo

Material	Permissividade relativa
Ar	1
Água (20°C)	80
Gelo (-3°C)	3
Basalto	12
Granito	7 - 9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: NOBORIO, (2001).

A figura 1 mostra os componentes básicos de um equipamento TDR.

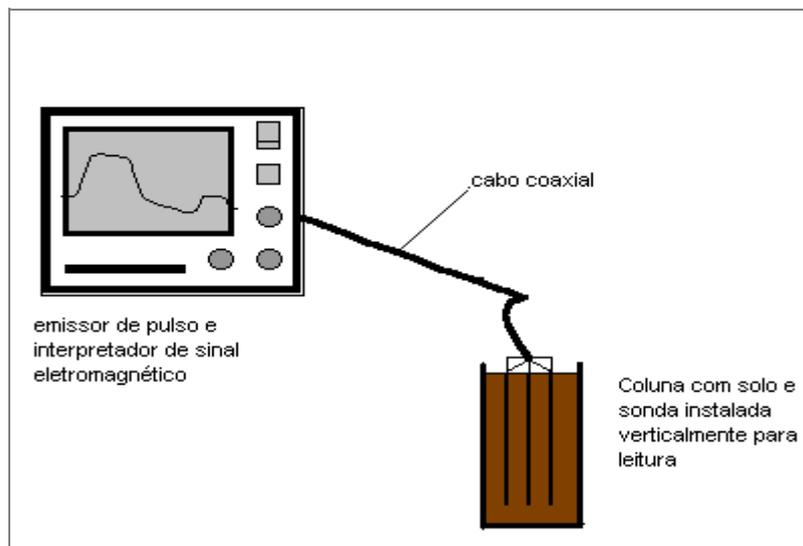


Figura 1 Esquema do experimento.

A velocidade de propagação do pulso eletromagnético no meio depende da constante dielétrica do meio. Assim sendo, o método do TDR depende da determinação do valor dessa constante para cada tipo de solo. A

determinação da constante dielétrica é feita com referência à propagação de um pulso no ar. Na Tabela 2, pode-se observar que para a água, a constante dielétrica é estimada em 80 e para os outros materiais constituintes do solo, a constante dielétrica varia de 2 a 12. Através da diferença significativa entre a constante dielétrica da água e a constante dielétrica dos outros componentes do solo é possível calcular o conteúdo de água no solo (NOBORIO, 2001).

A técnica de TDR tem sido aplicada com sucesso em muitos casos e, vários equipamentos já estão sendo produzidos em escalas comerciais, muito embora várias questões relacionadas à calibração dos instrumentos mereçam ainda estudos mais detalhados. A calibração do instrumento seria universal, bastando estabelecer-se à relação existente entre velocidade de propagação e a umidade do solo. O equipamento TDR traz embutida uma tabela de calibração sugerida como universal pelo fabricante. No entanto, face às grandes variações da composição dos solos, existe uma possibilidade de variação na calibração (TOMMASELLI, 1997).

Essa técnica da TDR determina a constante dielétrica K por meio do tempo de percurso de ondas eletromagnéticas, enviadas por geração de pulsos no cabo teste (Figura 1). O princípio de funcionamento do TDR esta baseada na propagação de ondas eletromagnéticas de alta freqüência (>50 MHz) que se propagam ao longo de hastes paralelas de metal, introduzidas no solo (NOBORIO, 2001), que são usualmente feitas de aço inoxidável ou de latão (TOMMASELLI, 1997; SOUZA, 2002); parte de uma onda eletromagnética, acidentalmente, é refletida no início da sonda, por causa da diferença de impedância entre o cabo e a sonda; o restante da onda se propaga através do cabo até o final da sonda, onde é refletida. O tempo t de ida e volta da onda, do início até o final da sonda, pode ser calculado por:

$$t = \frac{LK^{0,5}}{c} \quad (04)$$

Na qual:

t = é o tempo de ida e volta da onda (ns);

L = comprimento da sonda da TDR (m);

K = constante dielétrica;

c = velocidade de uma onda eletromagnética no espaço livre (ms^{-1}) (velocidade da luz [3×10^8]).

Dessa forma, conhecendo-se o tempo t de propagação do pulso, pode-se determinar o valor da constante dielétrica K. Considerando, que a constante dielétrica está altamente correlacionada com o conteúdo de água no solo, é possível estabelecer uma relação entre ambas de uma maneira tal que, a partir de uma, determina-se a outra (TOPP et al. 1980)

$$K = \frac{(ct)^2}{L} \quad (05)$$

TOPP et al, em 1980, foram os primeiros pesquisadores que aplicaram o princípio do TDR para determinar o conteúdo de água no solo. Os autores mediram o tempo de trânsito do pulso eletromagnético em um cabo coaxial de comprimento conhecido e correlacionaram o valor da constante dielétrica do solo com o seu conteúdo de água, θ . De lá para cá, essa técnica tem passado por diversos aperfeiçoamentos e melhorias que contribuíram com o aumento da precisão, quanto às possibilidades de aplicação (TOMMASELLI, 1997). TOPP et al. (1980) determinaram uma equação universal para calibração do TDR: esta equação é uma relação empírica entre a umidade do solo (θ) e a constante dielétrica (K) e serve para uma ampla gama de tipos e texturas de solos (NOBORIO, 2001; CICHOTA, 2003).

$$\theta = 0,053 + 0,0229K - 0,00055K^2 + 0,0000043K^3 \quad (06)$$

A curva de calibração de TOPP et al (1980) teve muitas aplicações bem sucedidas em várias situações, outras calibrações também foram propostas baseadas em uma relação linear entre θ e o $K^{0,5}$.

Malicki et al. (1996), citado por NOBORIO (2001), propuseram uma nova equação de calibração geral que incorpora a densidade volumétrica do solo,

$$\theta = \left[\left(K^{0,5} - 0,819 - 0,168\rho b - 0,169\rho b^2 \right) / (7,17 + 1,18\rho b) \right] \quad (07)$$

onde θ é a umidade volumétrica no solo (m^3/m^3), K é a constante dielétrica do solo; ρb é a densidade volumétrica do solo ($mg.m^{-3}$). Essa equação foi testada com uma faixa ampla de texturas de solo (solos orgânicos e areias). Schaap et al. (1996), citados por NOBORIO (2001), confirmaram a validade da equação de MALICKI et al. (1996).

A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) tem sido usada como uma ferramenta para monitorar o transporte de soluto no solo, em estudos feitos em laboratório e em campo (LEE et al, 2001; CASSEL et al, 1994). A TDR determina, simultaneamente, medidas do conteúdo da umidade volumétrica e da condutividade elétrica (C_e) no solo em um sistema de medidas não destrutivo, podendo ser repetido tantas quantas vezes for necessário (DE NEVE et al., 2000; WRAITH et al., 2005).

2.4.1 Medidas da Condutividade Elétrica usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

Como a superfície de uma onda propaga-se ao longo de uma sonda TDR enterrada no solo, o sinal da energia é atenuado na proporção da Condutividade Elétrica ao longo do tempo de percurso. Essa proporção reduz o sinal da voltagem e serve como uma base para medidas simultâneas da C_e total e conteúdo volumétrico de água, usando TDR. A aplicação da TDR para medidas da C_e no solo é reconhecida por Dalton et al (1984), citados por Or et al. (2003), como um curto circuito irregular.

Ao se utilizar o equipamento TDR na determinação da Condutividade Elétrica em solos ou em soluções, são considerados os seguintes tipos de circuitos:

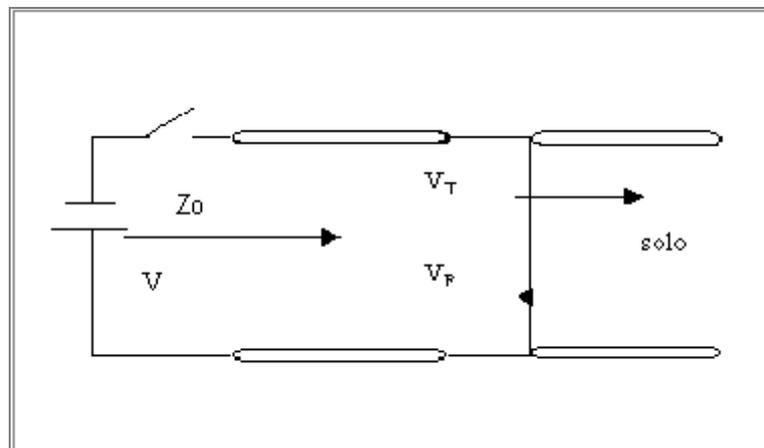


Figura 2 Circuito distribuído.

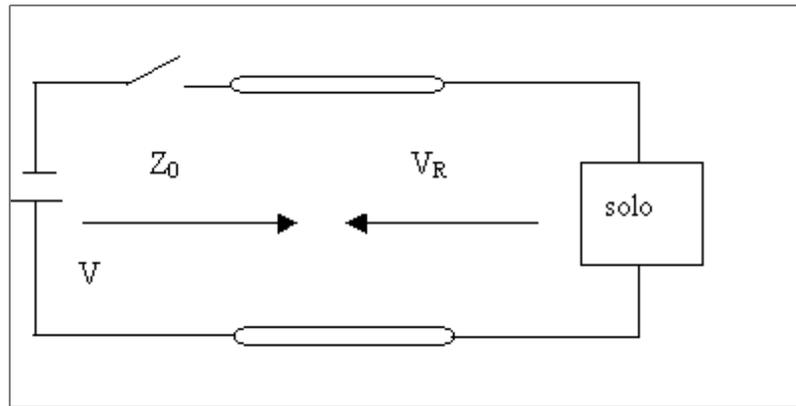


Figura 3 Circuito agrupado.

Nas Figuras 2 e 3, estão esquematizados os circuitos idealizados, usando um circuito distribuído e um agrupado, respectivamente. Na análise, V é a emissão de um pulso elétrico na linha, no nosso caso, um cabo coaxial de 50Ω (Z_0). O solo entre as hastes é o elemento com impedância Z_s , o pulso se propaga pelo cabo coaxial até alcançar a junção na conexão das sondas. Aí, três casos podem ocorrer:

- 1) – se há um circuito aberto significa que nada está conectado ao final do cabo, então uma onda exatamente com a mesma onda é refletida, numa situação ideal, assim a amplitude da onda refletida se combina com a amplitude da onda incidente para produzir com o dobro da onda inicial. Z_t é igual ao infinito (circuito aberto, figura 5)
- 2) – se houvesse curto na junção, então a onda incidente seria refletida. A forma da onda refletida seria negativa da incidente e a combinação resultaria em um sinal totalmente atenuado. Aqui $Z_t = 0$.
- 3) – o solo tem uma impedância entre os dois casos acima; somente parte da onda é refletida e o coeficiente de reflexão ρ relaciona a impedância de saída à impedância de entrada pela relação:

$$\rho = (Z_t - Z_c) / (Z_t + Z_c) \quad (08)$$

Onde:

Z_t é a impedância total, $Z_t = Z_s + Z_{cabo}$

Z_s = impedância do solo

$Z_{cabo} = Z_c$ = impedância de cabos conectores em equipamentos de leituras, geralmente 50 Ω .

Da equação 08 obtém-se a equação 09:

$$Z_t = Z_c \left[\left(\frac{1 + \rho}{1 - \rho} \right) \right] \quad (09)$$

ρ é medido depois de todas as reflexões do pulso. Para tempos longos, o sinal TDR percebe como uma simples resistência: $Z_s \cong R_s$. A resistência do solo depende da geometria da amostra e dos eletrodos de medida. A condutância específica σ (S/m) é mais útil e é dada em função da resistência R_s (Ω) e da constante da célula K (m^{-1}).

$$\sigma = \frac{K}{R_s} f(T) \quad (10)$$

Onde, $f(T)$ relaciona a dependência com a temperatura, equação 21.

A equação de condutividade tem a seguinte forma final:

$$\sigma = K \left[\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right] - Z_{cabo} \quad (11)$$

Os coeficientes de reflexões reais são medidos relativamente a uma calibração colocando $\rho = +1$ para $R_s = \infty$, e $\rho = -1$ para $R_s = 0$. O coeficiente (ρ) é usado para obter a condutividade elétrica total do solo.

Essa é apenas uma das muitas formas existentes para calcular a condutividade (C_e), como pode ser observada na tabela 3.

Como podemos observar há vários procedimentos diferentes para determinar a condutividade elétrica (C_e). O estudo de MUNOZ e CARPENA (2005) indica que a equação mais precisa, empregada em seus estudos foi a equação 6. Este método usa apenas dois níveis de voltagem na onda, mas exige três ou mais soluções de referência para determinar K e Z_{cabo} . As soluções de referência devem ter a condutividade elétrica no intervalo que está sendo medido. As condutividades elétricas conhecidas das soluções e os ρ medidos dos gráficos da TDR podem ser usados com a equação 6 da tabela 3, e com um algoritmo de ajuste para alcançar nosso objetivo.

A Tabela 3 relaciona todas as equações utilizadas por MUÑOZ-CARPENA (2005) em seu estudo.

Tabela 3 Equações utilizadas para calcular a C_e total do solo

Referência	Equação	
Giese e Tieman (1975)	$C_e = \left(\sqrt{\varepsilon_0} / 120\pi L \right) \left[(2V_0 / V_f) - 1 \right]$	1
Dalton et al. (1984)	$C_e = \left(\sqrt{\varepsilon_0} / 120\pi L \right) \left[(V_1 / V_2 - V_1) \right]$	2
Topp et al. (1988)	$C_e = \left(\sqrt{\varepsilon_0} / 120\pi L \right) \ln \left[(V_1(2V_0 - V_1) / V_0(V_2 - V_1)) \right]$	3
Yanuka et al. (1988)	$C_e = \left(\sqrt{\varepsilon_0} / 120\pi L \right) \left[(V_1 * V_f - V_0(V_1 + V_f)) / V_0(V_1 - V_f) \right]$	4
Zegelin et al. (1989)	$C_e = \left(\sqrt{\varepsilon_0} / 120\pi L \right) * V_1 / V_f \left[((2V_0 - V_f) / (2V_0 - V_1)) \right]$	5
Nadler et al. (1991)	$C_e = \left(\frac{K}{Z_s} \right) f_T$	6

Fonte: MUNOZ-CARPENA (2005).

Onde:

L = comprimento da sonda TDR (m)

C_e = condutividade total do solo (S/m)

V_0, V_1, V_2 e V_{inf} = valores definidos nas figuras 3 e 4.

O coeficiente de reflexão ρ , também pode ser determinado através da impedância do cabo coaxial (Z_c, Z_0 ou $Z_u = 50 \Omega$).

$$\rho = (Z_L - Z_C) / (Z_L + Z_C) \quad (12)$$

$$\rho = [(V_f - V_0) / V_0] \quad (13)$$

Onde:

V_0 é a voltagem no início da sonda e V_f é a voltagem na reflexão final da onda. Ver figura 4.

Z_L pode ser determinado através da equação 14.

O coeficiente (ρ) também pode ser determinado pelo rearranjo da Equação 12, assim:

$$Z_L = \frac{Z_C(1 + \rho)}{(1 - \rho)} \quad (14)$$

Onde ρ é determinado após múltiplas reflexões. Dalton et al. (1990) e Nadler et al. (1991), citados por NOBORIO (2001), obtiveram experimentalmente uma constante K que pode ser usada para calcular a Condutividade Elétrica através de medidas de carga da impedância:

$$CE = K / Z_L \quad (15)$$

A constante K da sonda também pode ser determinada mergulhando-se a sonda em várias soluções de Condutividade Elétrica conhecida e utilizando a Equação 16.

$$K = CE_{ref} Z_L / f_T \quad (16)$$

Onde:

$C_{e_{ref}}$ é a condutividade elétrica conhecida e f_T é um coeficiente de correção da temperatura. HEIMOVAARA et al. (1994) encontraram a seguinte relação:

$$f(T) = 1/[1 + 0,019(T - 25)] \quad (17)$$

Esse coeficiente de correção pode ser usado para uma variedade de soluções salinas, com 25°C como temperatura padrão.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Saneamento, Geotecnia e Física, localizados na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus de Cascavel.

Nele foi empregado o equipamento Trase System 6050X1, o qual permite fazer medições, gravar as leituras e gráficos e transferi-los para o computador, com dados que podem ser armazenados ou impressos, conforme mostra o manual fornecido pelo fabricante (SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION, 1998).

O experimento da pesquisa foi montado em 7 etapas, após a coleta e preparo do solo, constituindo Terra Fina Seca ao Ar (TFSA):

- Primeira etapa: confecção e calibração das sondas;
- Segunda etapa: preparo das soluções salinas;
- Terceira etapa: leitura do sinal eletromagnético, utilizando a TDR em cada solução, ou seja, em cada nível de salinidade;

- Quarta etapa: contaminação das amostras de solo, utilizando as soluções salinas preparadas. Esta etapa constava de cinco repetições para cada nível de contaminação de sal (NaCl), sendo que no experimento usou-se 8 níveis de contaminação: 0; 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09; 0,1 e 0,15 N. As colunas utilizadas para montar as amostras de solo eram de PVC, as mesmas utilizadas na calibração das sondas;
- Quinta etapa: leitura do sinal eletromagnético em cada uma das cinco amostras de solo contaminado com cada nível salino, utilizando o TDR. Nesta etapa, foram efetuadas quarenta leituras;
- Sexta etapa: leitura do sinal eletromagnético emitido pela sonda no ar e em curto circuito;
- Sétima etapa: interpretação dos dados.

3.1 Captura dos dados

Para gerenciar a comunicação entre o equipamento TDR e o computador, foi usado o programa denominado "INFOSYS-TDR" (BUSATTA, 2005). Esse programa foi desenvolvido com a linguagem de programação Object Pascal (Delphi), sendo que o armazenamento e a restauração dos dados são realizados através do sistema gerenciador de banco de dados "FIREBIRD 1.5", usando o componente de comunicação serial "ComDrv32". Tal componente permite a comunicação entre o equipamento TDR e o computador, através de uma conexão de 25 pinos (DB25) e fornece comandos para o início e término da conexão e para envio e recebimento de dados ao computador. Os comandos enviados ao equipamento Trase utilizam protocolos especificados pelo fabricante do equipamento. Esses protocolos definem o conjunto de caracteres, os comandos executáveis e seus formatos, o formato de resposta e os códigos de erros.

As condições necessárias para transferir os dados do equipamento para um computador, pelo sistema INFOSYS-TDR, são as seguintes:

Um computador PC com porta serial disponível;

Um programa de comunicação como o “Terminal” no Windows 3.1 e o “Hyperterminal” no Windows 95 ou versão posterior.

Um cabo para conectar o equipamento TRASE TDR ao computador. O cabo deve possuir uma conexão de 25 pinos (DB-25) que pode ser conectada à porta do equipamento de TDR. A outra ponta do cabo necessita uma conexão apropriada para ser conectada à porta serial do computador.

Servidor de banco de dados “FIREBIRD”, versão 1.5 ou superior.

Para iniciar o envio ou o recebimento de dados, o programa deve ser configurado com os mesmos parâmetros do equipamento TDR (SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORPORATION, 1998), os quais são:

Baud 9600;

Stop bits 1;

Parity none;

Flow control xon/xoff.

Após a configuração dos parâmetros, deve-se estabelecer uma conexão entre o equipamento TDR e o computador. Estabelecida a conexão, o usuário poderá escolher na tela principal do programa a opção desejada para iniciar a troca de informações.

Para utilizar o programa, o usuário precisa primeiramente estabelecer uma conexão entre o equipamento e o computador, ligando o cabo RS-232. O próximo passo é acionar o interruptor do equipamento e pressionar a tecla “ON/ENTER”: estabelecida essa conexão, o usuário deverá escolher na tela principal a opção desejada para iniciar a troca de informações entre programa e equipamento. Caso se deseje realizar leituras, as guias precisam estar corretamente adaptadas ao equipamento TDR.

3.2 Coleta do solo

O solo empregado no experimento foi coletado no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), próximo à BR 467 – Km 101, Cascavel - PR, com localização geográfica 24°54'0,148" latitude sul e 53°31'57,312" longitude oeste de Greenwich e altitude 750 m. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, sendo coletado a uma profundidade de 0,05 a 0,2 m.

O solo foi coletado no local determinado, destorroado, peneirado em peneira de 2,0 mm de malha, deixado à sombra para que ocorresse a secagem ao ar, obtendo-se dessa forma terra fina seca ao ar (TFSA). A análise mecânica do solo utilizado é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 Características físicas do solo do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Local	Profundidade (m)	Silte (%)	Areia (%)	Argila (%)
NEEA	0.05 – 0.2	27.9	3.04	69.06

A Tabela 5 mostra a quantidade de cada componente do solo utilizado no experimento.

Tabela 5 Análise química do solo do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Item	Unidade	Quantidade	Classificação
P	mg/dm ³	5,70	Médio
C	g/dm ³	23,22	Alto
pH	CaCl ₂	5,80	Alto
H + Al	Cmol/dm ³	4,61	
Ca	Cmol/dm ³	7,73	Alto

Mg	Cmol/dm ³	4,60	Alto
Ca + Mg	Cmol/dm ³	12,33	
Al	Cmol/dm ³	0,0	Baixo
K	Cmol/dm ³	0,14	Médio
Cu	mg/dm ³	8,80	Alto
Zn	mg/dm ³	1,28	Médio
Fe	mg/dm ³	68,10	Alto
S	mg/dm ³	12,47	Alto
T	mg/dm ³	17,08	Alto
% V1	%	73,01	Alto
% Al	%	0,0	Muito baixo
% Ca	%	45,26	Médio
% Mg	%	26,93	Alto
% K	%	0,82	Baixo
% Ca/Mg	%	1,68	Médio
% Ca/T	%	55,21	Alto
% Mg/K	%	32,86	Alto
% CaMg/K	%	88,07	Alto
K Ca Mg		0,04	Baixo

3.3 Confeção e calibração das sondas

Foram montadas 20 sondas TDR, seguindo a técnica explicada em MATSURA et al. (2001) detalhada em VILWOCK et al. (2002), com as alterações delineadas em NOBORIO (2001).

As sondas foram confeccionadas com três hastes de 0,25 m de comprimento e com distâncias entre hastes de 0,15 m. As hastes foram feitas de aço inoxidável, sendo ligadas a um cabo coaxial com comprimento de 1,5 m através de soldagem. Para uma melhor fixação das hastes ao cabo coaxial, antes da soldagem, elas foram limpas com uma solução 0,5% de ácido fosfórico. Ligadas ao cabo coaxial, foram acomodadas em um gabarito feito em alumínio nas dimensões desejadas. Logo em seguida, adicionou-se resina epóxi para formar um bloco resistente, promovendo desta forma sustentação ao esqueleto da sonda. A Figura 4 apresenta os detalhes construtivos das sondas.

As sondas confeccionadas foram testadas e calibradas, primeiramente, em solo saturado com água. A Figura 4, mostra como foram confeccionadas todas as sondas utilizadas no experimento.

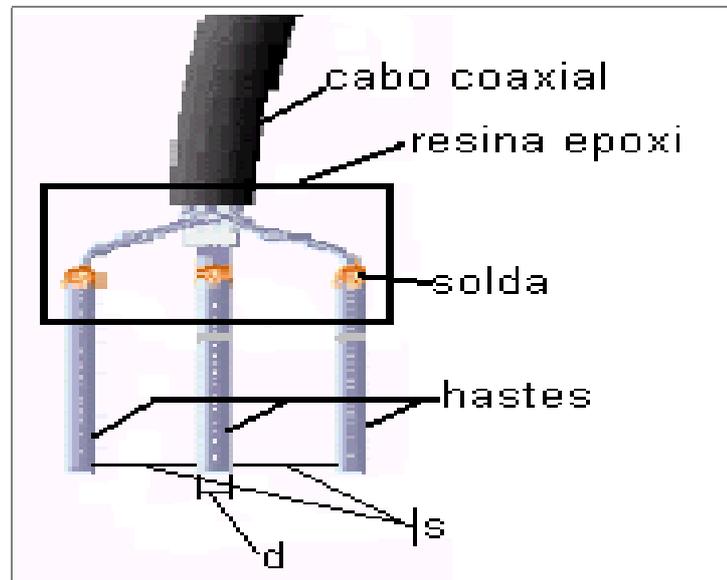


Figura 4 Diagrama estrutural de uma sonda TDR.

A calibração das sondas foi realizada no Laboratório de Física, na Universidade do Oeste do Paraná, no período de 31 de outubro à 22 de dezembro de 2005. A colocação do solo nas colunas foi realizada de tal forma a obter uma densidade constante para todas as colunas para que este fator não influenciasse nos tratamentos.

Construíram-se 5 colunas de solo deformado com 0,30 m de altura e 0,195 m de diâmetro. Foram usados papel filtro e tela fina, sendo colocados na parte inferior do segmento de tubo para evitar perda de solo. O conjunto foi previamente pesado. A colocação do solo dentro das colunas foi feita a uma altura constante, logo acima da abertura superior da coluna, em quantidade conhecida e constante. Após a colocação de cada quantidade, a coluna era

batida sobre uma base de borracha por três vezes, para que ocorresse o assentamento do solo dentro da coluna e se evitasse a formação de espaços vazios. Posteriormente, a coluna foi pesada. Após a montagem das colunas, ambas foram colocadas dentro de um recipiente para saturar durante 48 horas. A quantidade de água colocada no recipiente foi 2/3 da altura da coluna, Figura 5. Depois de saturadas as colunas, instalaram-se as sondas verticalmente e, imediatamente, feitas as primeiras leituras. Posteriormente, as colunas foram pesadas para se obter o peso total, Figura 6. Os recipientes contendo as sondas foram colocados em uma bancada e mantidos com a superfície do solo exposta, para permitir perda de água apenas por evaporação.

Todos os dias, no mesmo horário, eram feitas as leituras dos valores da constante dielétrica aparente do solo (K_a) e, logo em seguida, as colunas eram pesadas, para se obter as perdas diárias de água. Isso foi repetido durante um período de 23 dias. No final deste período, as umidades do solo atingiram $0,31 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, sendo que a temperatura ambiente, neste período, variou entre 25°C e 35°C .

Após os 23 dias da saturação, as sondas foram retiradas, assim como a tela da parte inferior da coluna de PVC, e coletadas 3 amostras de solo em diferentes localizações, que foram levadas à estufa a 105°C durante 48 horas para atingir peso constante. Com base no peso seco da amostra somado aos pesos das sondas do segmento de tubo mais o papel e a tela e pelas pesagens diárias, foi possível determinar os teores de água correspondentes a cada pesagem, conforme COELHO et al., 2003.



Figura 5 Coluna de solo em processo de saturação.

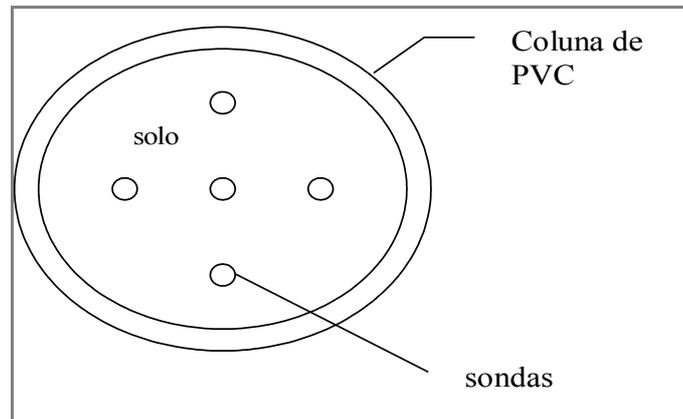


Figura 6 Esquema representativo da disposição simétrica das sondas na coluna de PVC, durante a calibração.



Figura 7 Sondas TDR durante o período do experimento.

3.4 Determinação da impedância das sondas (Z_0)

É necessário determinar a impedância da sonda, pois a ela é a grandeza física que relaciona a variação de voltagem e corrente com a distância ao longo de uma linha de transmissão uniforme, sendo geralmente utilizada para avaliar a performance das sondas TDR (SOUZA, et al, 2002).

A impedância (Z_0) de uma linha coaxial de transmissão ideal depende exclusivamente da geometria da linha (ZEGELIN et al., 1989) e pode ser calculada por:

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{2s}{d} \right) \quad (18)$$

Onde:

s = raio do condutor externo, m;

d = diâmetro do condutor interno, m.

Segundo ZEGELIN et al.(1989) e HEIMOVAARA et al(1994), pode-se determinar a impedância Z_0 através do coeficiente de reflexão da sonda, quando a mesma está envolta por um material dielétrico uniforme, através da seguinte expressão:

$$Z_0 = Z_u K^{0,5} \frac{(1 + \rho)}{(1 - \rho)} \quad (19)$$

Onde:

Z_u = impedância do cabo $\approx 50 \Omega$

$K = 81$ e ρ = coeficiente de reflexão, definido através da equação 20.

$$\rho = \frac{V_1}{V_0} - 1 \quad (20)$$

Na equação que define o coeficiente de reflexão envolve as seguintes quantidades típicas:

A amplitude do sinal eletromagnético gerado pela TDR V_0 ;

A amplitude do sinal eletromagnético depois da reflexão no início da sonda V_1 ;

A figura 8 mostra o esquema para a determinação dessas grandezas.

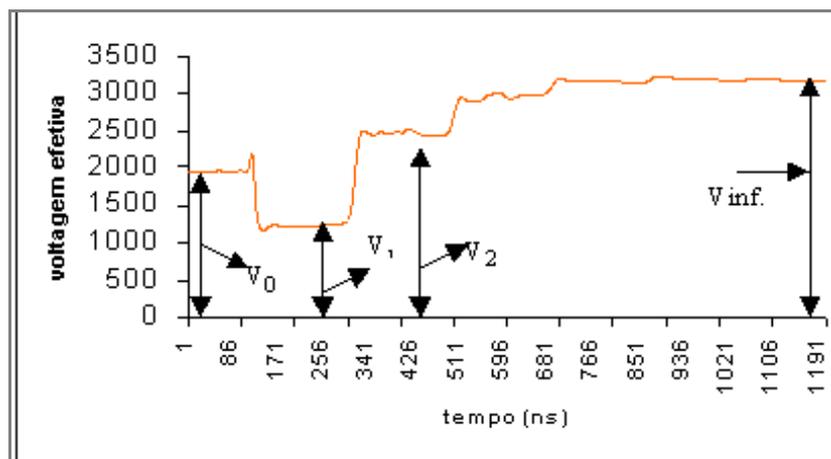


Figura 8 Esquema para encontrar V_0 , V_1 e $V_{inf.}$, em um gráfico obtido com uma sonda mergulhada em água destilada a 20 C° .

Para Giese e Tieman (1975) citados por: TOPP et al., (1988); WINTDR (2003); WRAITH et al., (2005), a condutividade elétrica também pode ser calculada através da equação:

$$C_e = \left(\frac{\epsilon_0 c}{L} \right) \left(\frac{Z_0}{Z_u} \right) \left(\frac{2V_0}{V_{inf}} - 1 \right) \quad (\text{S/m}) \quad (21)$$

Onde:

ϵ_0 = permissividade no espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

c = velocidade da luz (3×10^8 m/s)

L = comprimento da sonda (m)

Z_0 = impedância característica da sonda. (Ω)

Z_u = impedância do cabo (50Ω)

V_0 = pulso incidente da onda, ver figura 8.

V_{inf} = pulso depois da reflexão, ver figura 8.

A equação 21 pode ser simplificada fazendo-se $\epsilon_0 c = 1/(120\pi L Z_u)$ (ZEGELIN & WHITE, 1989)

V_0 e V_{inf} podem ser encontrados conforme a Figura 9.

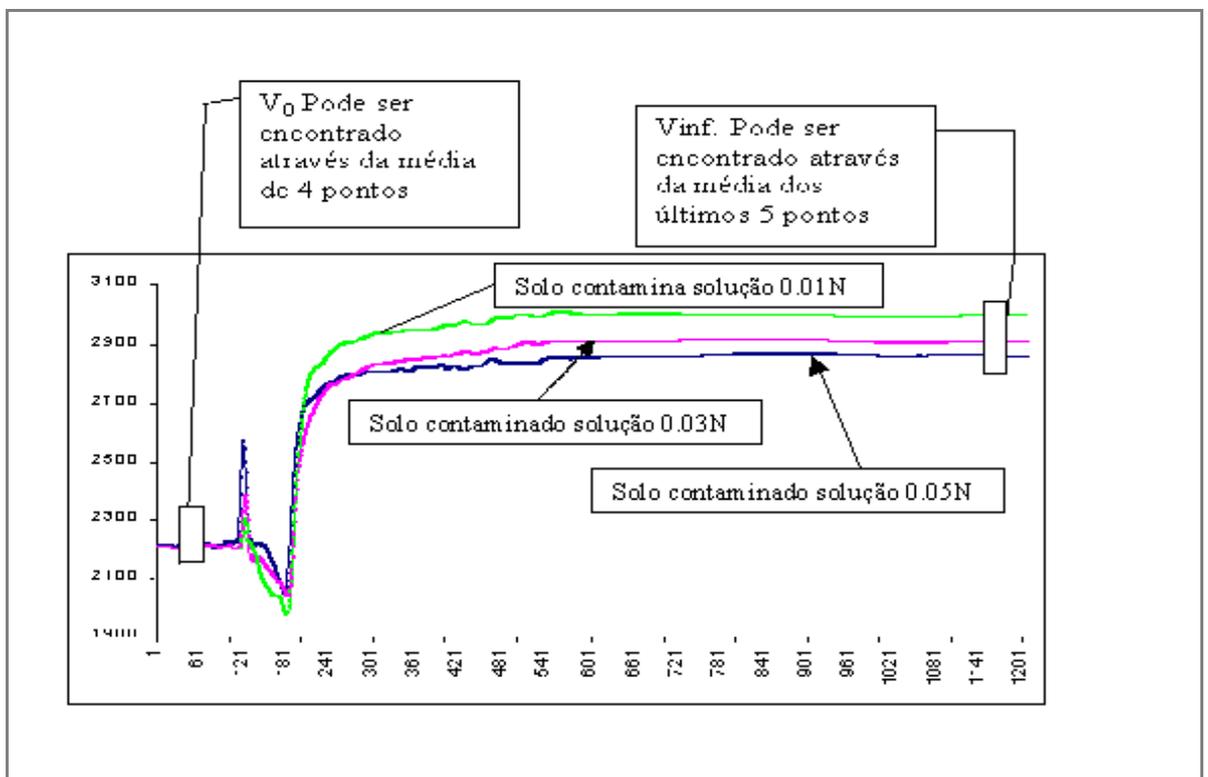


Figura 9 Determinação dos valores de V_0 e de V_{inf} .

3.5 Preparo das soluções salinas

O sal (cloreto de sódio P.A. - A.C.S. P.M. 58.44 lote 87602 Synth) foi secado em estufa durante uma hora à temperatura de 300°C; resfriado em dessecador, logo após pesado em balança de precisão para obter a massa necessária para cada nível de salinidade e dissolvido na quantidade de água destilada suficiente o necessário para contaminar cada amostra de solo.

Após preparadas as soluções, foram efetuadas as leituras de sinal eletromagnético com a TDR.

3.6 Preparação das amostras de solo contaminado.

Para contaminar o solo, foram preparadas sete soluções de cloreto de sódio com concentrações de 0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09; 0,1 e 0,15 N. O sal foi dissolvido em água destilada, nas proporções apresentadas acima. Antes de contaminar o solo, foram efetuadas leituras com as sondas TDR nas soluções e os resultados obtidos estão representados na Figura 32.

A montagem das colunas com solo foi feita da mesma forma que foram montadas para calibração das sondas. Cada quantidade de sal foi dissolvida em 2,5 litros de água destilada, para obter o mesmo valor de umidade volumétrica em todas as amostras de solo. Foi; ainda, pesado 9,5 kg de massa de solo (TFSA) para ser contaminado com cada nível de sal. Após dissolução de cada teor de NaCl em água destilada, a solução obtida foi borrifada no solo espalhado em uma superfície, peneirado 4 vezes para obtenção de uma mistura homogênea e colocado nas colunas de PVC, da mesma forma como

foram montadas as colunas anteriores. Construíram-se 5 colunas para cada teor de solução, em seguida, foram introduzidas as sondas verticalmente nas colunas e esperados 10 minutos para que ocorresse um equilíbrio. Após esta etapa, foram efetuadas as leituras em cada coluna, totalizando 5 leituras (1 leitura em cada coluna) para cada nível de salinidade presente na amostra, sendo que as leituras obtidas em cada coluna do mesmo nível de sal foram iguais para cada sonda utilizada.

3.7 Leitura do sinal eletromagnético da sonda no ar e em curto circuito

A Figura 10 mostra como foram efetuadas as leituras de todas as sondas no ar.

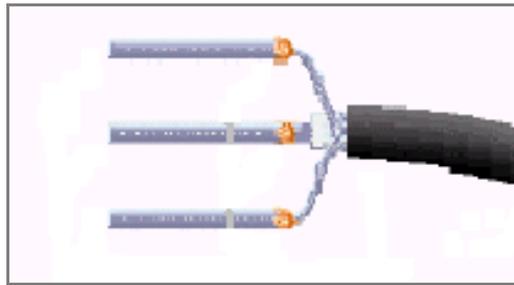


Figura 10 Esquema da leitura do sinal eletromagnético no ar.

A Figura 11 mostra como foram efetuadas as leituras de todas as sondas em curto circuito.

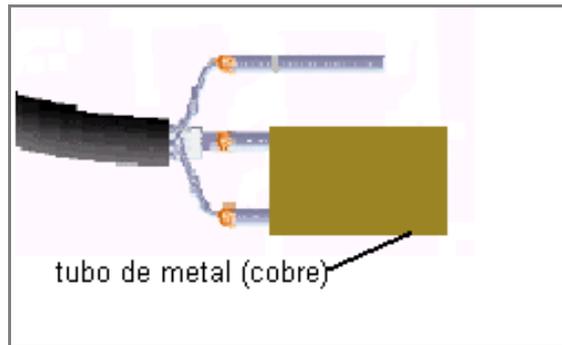


Figura 11 Esquema representativo da leitura do sinal eletromagnético com a sonda em curto circuito

Para curto circuitar a sonda foi usado um tubo de cobre, o qual interligava duas das hastes da sonda e efetuada a leitura conforme figura 11.

3.8 Determinação da condutividade elétrica das soluções através do sinal eletromagnético captado pela TDR.

Para a obtenção do coeficiente de reflexão empregando-se o equipamento TDR, os dados obtidos através do programa Infosys-TDR (BUSATA, 2005) formaram um conjunto de 1200 pontos, sendo que cada ponto corresponde a duas informações: no eixo horizontal tem-se o tempo de trânsito (em ns) e no eixo vertical tem-se a medida do coeficiente de reflexão, o qual é um número que deve ser relacionado aos valores para o circuito aberto e para o circuito em curto-circuito. Esse relacionamento é o chamado escalonamento do espectro (CASTIGLIONE & SHOUSE, 2003)

A condutividade elétrica total do solo e das soluções foi determinada com o emprego da equação de Giese e Tiemann (1975), citado por TOPP et al. (1988); citado por OR et al. (2003).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.

4.1 Resultados obtidos com o emprego do programa INFOSYS-TDR

A Figura 12, a seguir, mostra como leituras e gráficos, armazenados no banco de dados do programa INFOSYS-TDR, podem ser acessados e visualizados através da tela do microcomputador. Já a figura 13 traz a visualização da captura de dados no momento de sua obtenção.

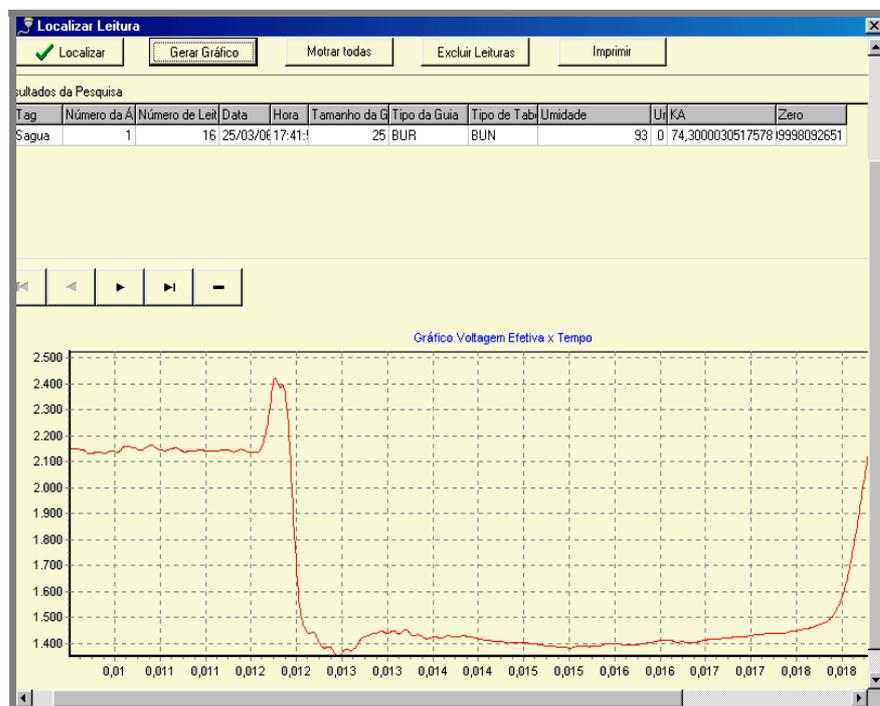


Figura 12 Tela mostrando a recuperação de dados armazenados em banco de dados, através do programa INFO-SYS TDR.

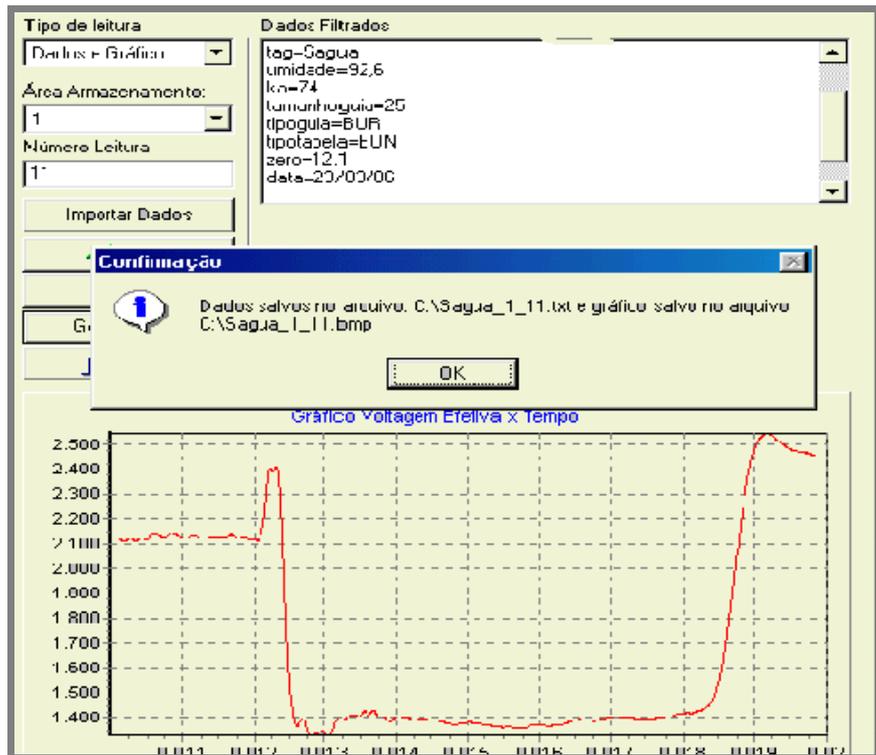


Figura 13 Tela mostrando registro de dados e gráfico, obtidos através do programa INFO-SYS TDR.

O emprego do programa INFO-SYS TDR facilitou as tarefas na organização dos dados. A inserção de datas válidas foi rápida com o emprego de um calendário que é disponibilizado assim que se aciona a seta ao lado da data. O mesmo procedimento agilizou a colocação da hora certa.

Como os dados ficam gravados no banco de dados enquanto não forem excluídos pelo usuário, é possível visualizar as leituras, realizar impressões e ver os gráficos. Também se pode excluir um único registro ou todos de uma só vez. Além de permitir a visualização dos dados e gráficos no monitor, o sistema apresenta recursos para disponibilizar dados e gráficos via impressora ou em arquivos.

Tanto a economia de tempo para o usuário na realização das leituras, armazenamento, acesso e resgate das mesmas, como a segurança que se pode ter com o armazenamento dessas informações, foram observadas claramente quando o sistema foi utilizado.

Muito embora novas espécies de análises da forma da onda TDR estejam sendo adotadas, tais como funções iterativas (MORET et al., 2006), o emprego de programas específicos ainda é a melhor alternativa.

4.2 Montagem e calibração das sondas

A Figura 14 mostra uma sonda já montada, em condições de ser utilizada.

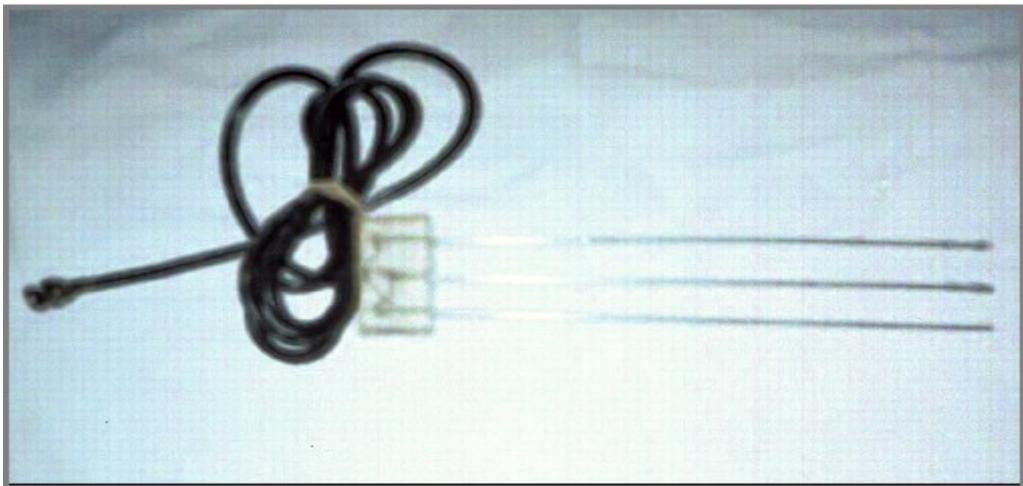


Figura 14 Sonda já montada.

As Figuras 15 a 17 mostram a correlação entre a constante dielétrica aparente do solo (K_a) e a umidade volumétrica (UV), obtida através de pesagens e leituras diárias, durante a calibração das sondas 16, 18 e 19. Pode-se notar que o modelo polinomial cúbico ajusta-se para as sondas, apresentando uma correlação (R^2) próxima de 1. Esses resultados confirmam os resultados iniciais de Topp et al. (1980).

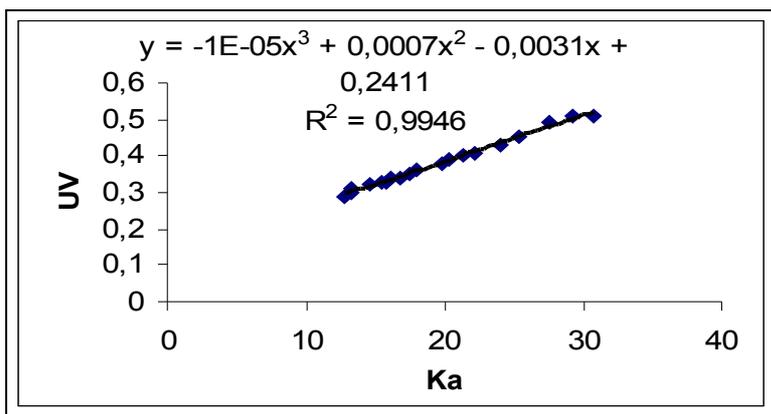


Figura 15 Correlação entre umidade volumétrica (UV) e a constante dielétrica aparente (Ka) lida no solo durante a calibração da sonda 16.

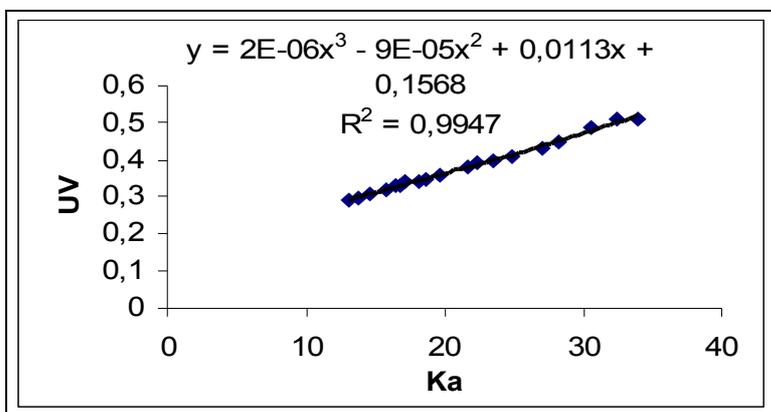


Figura 16 Correlação entre umidade volumétrica (UV) e a constante dielétrica aparente (Ka) lida no solo durante a calibração da sonda 18.

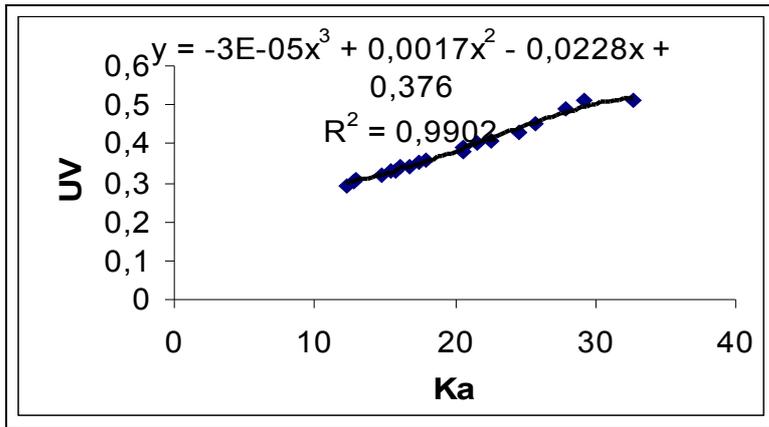


Figura 17 Correlação entre umidade volumétrica (UV) e a constante dielétrica aparente (K_a) lida no solo durante a calibração da sonda 19.

A Figura 18 representa a correlação entre a constante dielétrica aparente do solo e a umidade volumétrica, para a calibração de todas as sondas durante o período de secagem do solo.

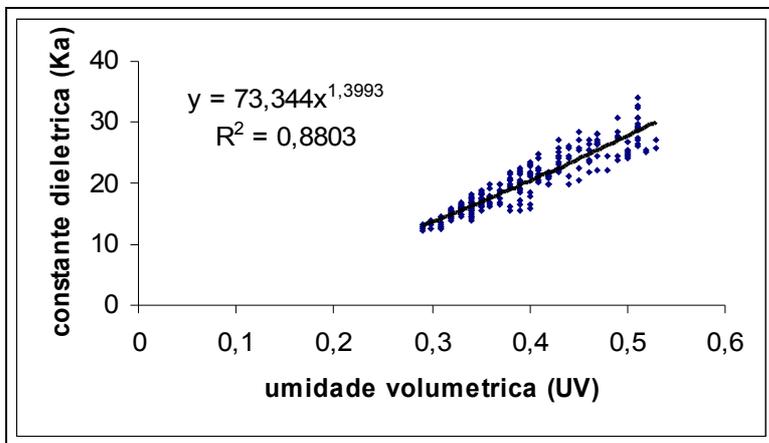


Figura 18 Correlação entre K_a e umidade volumétrica, com dados de todas as sondas.

4.3 Impedâncias características das sondas

A Tabela 6 mostra os valores obtidos para as impedâncias características das 3 sondas testadas. Nota-se que todos os valores de impedância estão com valores igual ou menor que 200 ohms.

Tabela 6 Impedância característica das sondas

Sondas com três hastes	Z _o , Ω		Razão Geométrica Medida
	Geométrico Equação (18)	Medido Equação (19)	
16	147,91	188,97	0,783
18	147,91	200,00	0,735
19	147,91	186,30	0,794

Os resultados indicam que o espaçamento entre hastes e o diâmetro afetam fortemente a impedância da sonda

Muito embora as hastes não apresentassem perfeito paralelismo, devido as dificuldade da montagem artesanal, os resultados não foram afetados, comprovando que as medidas da constante dielétrica aparente não sofreram alterações (STEIN & KANE, 1983).

O desempenho da sonda é um importante ponto, pois o volume amostrado por uma sonda depende de sua geometria. Configurações diferentes de sondas resultarão em sensibilidades espaciais diferentes. Também, o comprimento do cabo é um fator importante, pois cabos longos (acima de 20 m) filtram as frequências mais altas do sinal gerado pelo equipamento.

4.4 Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 16, para as soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.

A Figura 19 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 16, leitura efetuada no ar e em curto circuito.

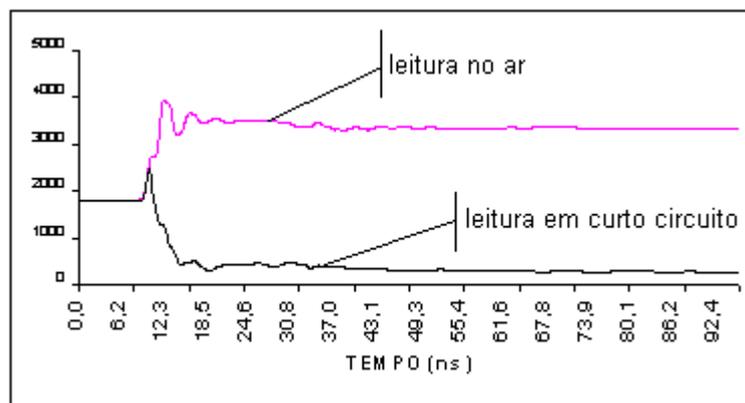


Figura 19 Forma da função de onda no ar e em curto-circuito para a sonda 16.

A Figura 20 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 16, leitura efetuada no ar e em curto circuito e em todas as soluções de diferentes concentrações.

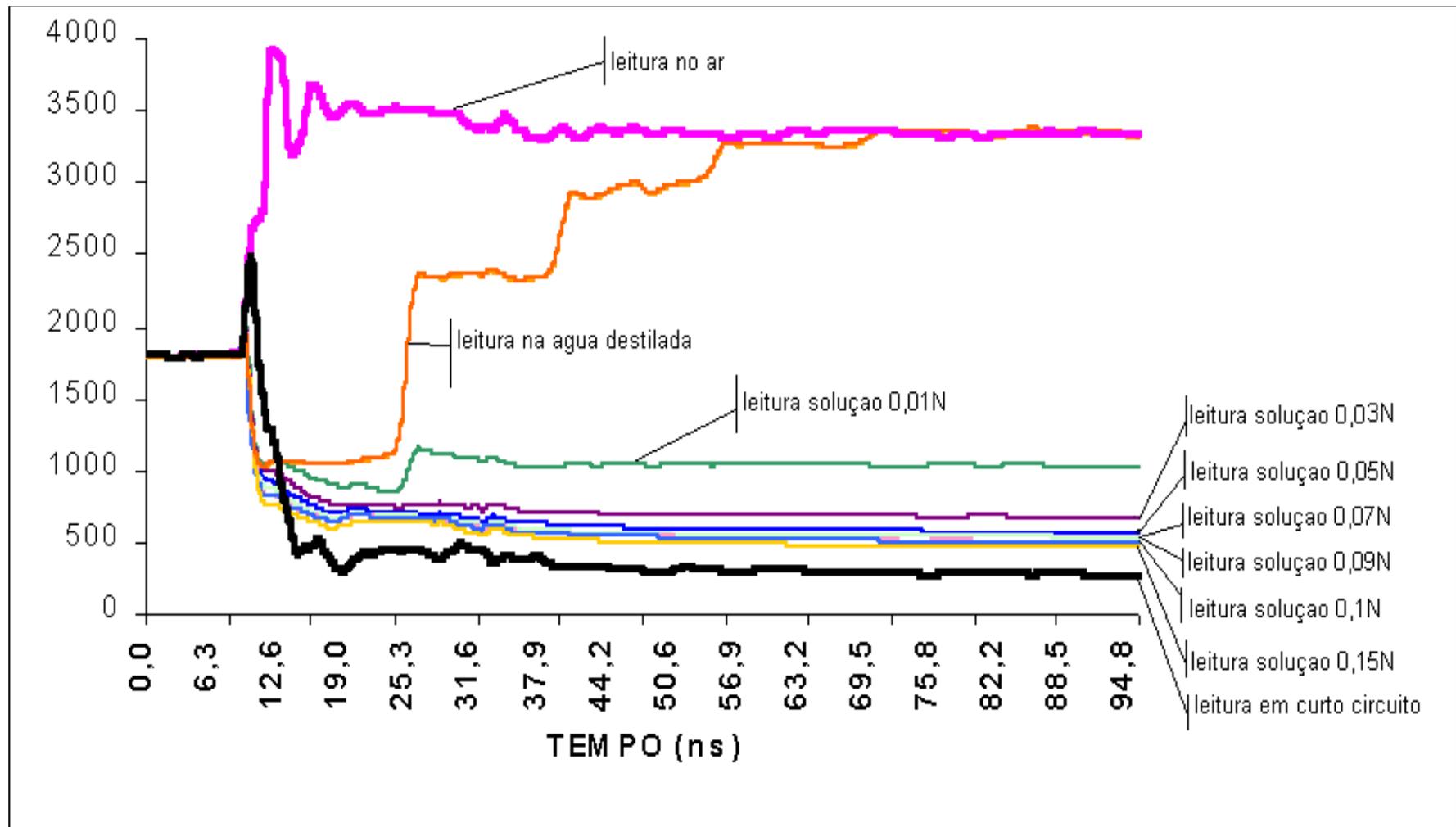


Figura 20 Formas da função de onda obtida através da sonda 16 no ar, em curto-circuito e em soluções de diferentes concentrações.

4.5 Determinação da condutividade elétrica (CE) usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann para a sonda 16.

A Tabela 7 mostra a condutividade elétrica lida através do condutivímetro na solução do solo e a condutividade elétrica calculada para as leituras da sonda 16.

Tabela 7 Cálculo da Condutividade Elétrica das Soluções com diferentes níveis de NaCl com o emprego da sonda 16

Concentração de NaCl (N)	Ce lida através do condutivímetro	Ce calculada Pela eq. 21	Ka lida pela TDR
Água destilada	0,0002	0.0003	74,8
0.01	0,1120	0.0100	74,2
0.03	0,3200	0.0175	0
0.05	0,5150	0.0209	0
0.07	0,6980	0.0231	0
0.09	0,8780	0.0245	0
0.1	0,9610	0.0248	0
0.15	1,3330	0.0279	0

A figura 21, a seguir, mostra a correlação entre as leituras efetuadas através do condutivímetro na solução do solo e os valores lidos através da TDR, no solo contaminado com as soluções de diferentes teores de sal. Esses valores foram obtidos com a sonda 16. Pode-se notar que o modelo apresenta um coeficiente R^2 próximo de 1.

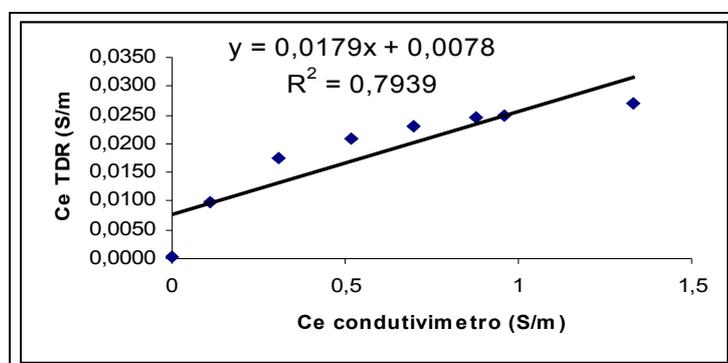


Figura 21 Análise de regressão para os valores obtidos através do condutivímetro e os valores calculados

Pode-se observar através da Tabela 7 que os valores obtidos através da TDR foram menores que os lidos pelo condutivímetro, exceto para a água destilada que teve um valor superestimado.

4.6 Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 18, para as soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio

A Figura 22 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 18, leitura efetuada no ar e em curto circuito.

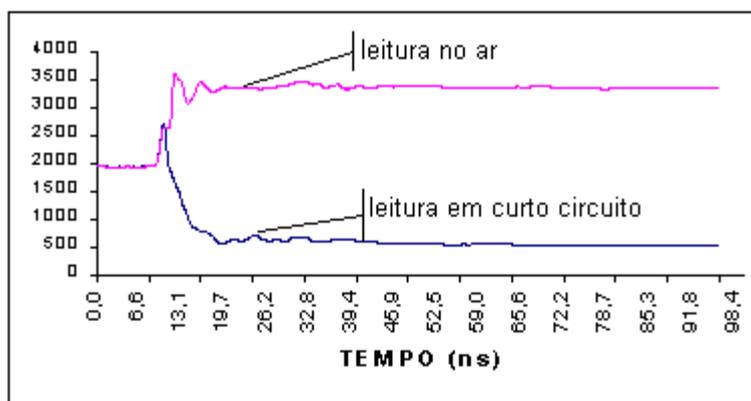


Figura 22 Sinal de pulso eletromagnético emitido pela TDR sonda 18, leitura obtida no ar e em curto.

A Figura 23 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 18, leitura efetuada no ar, em curto circuito e em todas as soluções de diferentes concentrações.

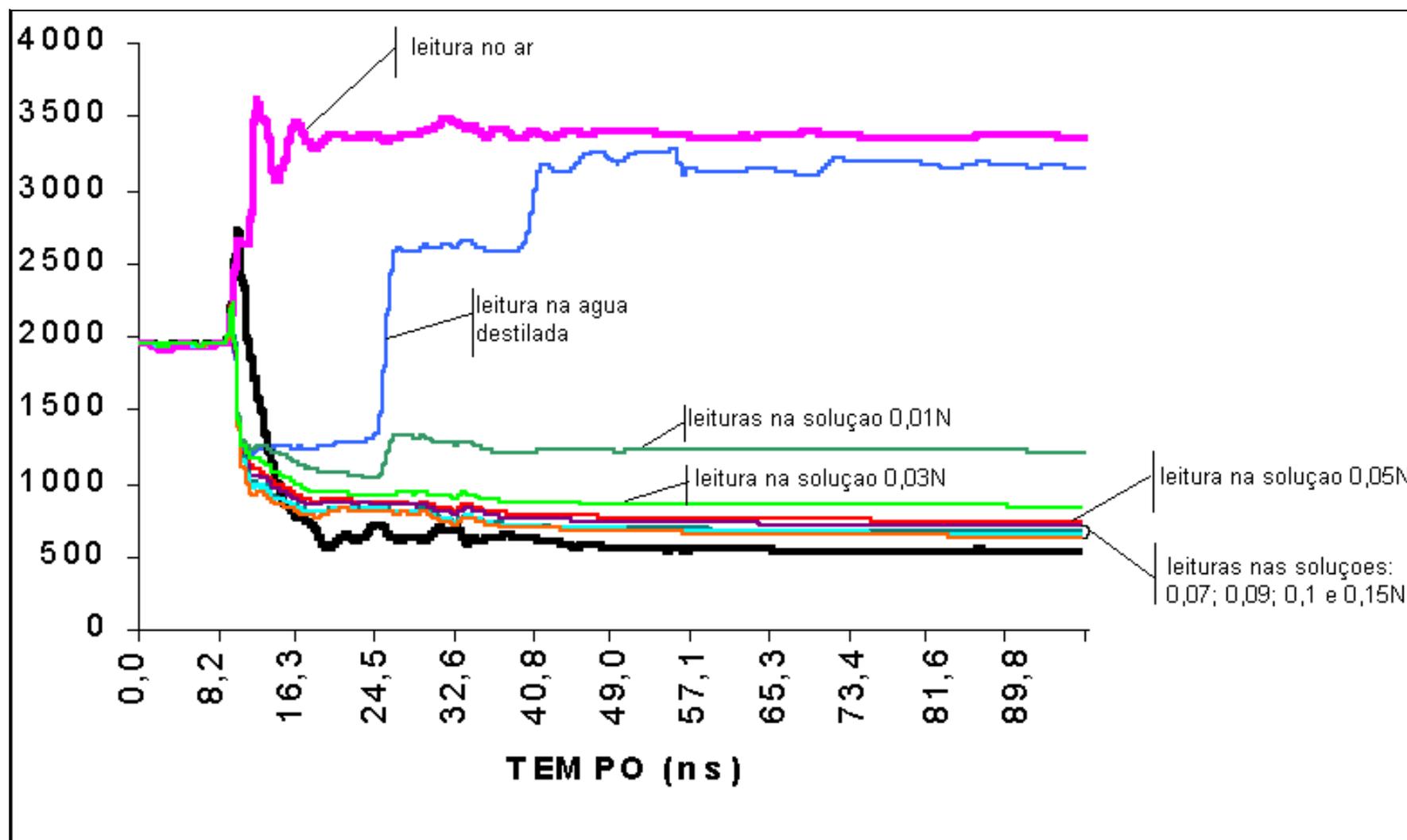


Figura 23 Resultados obtidos através da sonda 18 para soluções de diferentes concentrações.

4.7 Determinação da condutividade elétrica (CE) usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese -Tiemann para a sonda 18.

A Tabela 8 mostra a condutividade elétrica lida através do condutivímetro na solução do solo e a condutividade elétrica calculada para as leituras da sonda 18.

Tabela 8 Determinação da Condutividade Elétrica das Soluções com diferentes teores de cloreto de sódio através da sonda 18

Concentração de NaCl (N)	CE lida através do condutivímetro	Ce calculada pela equação 21	Ka lida pela TDR
Água destilada	0,0002	0.0010	74,7
0.01	0,1120	0.0030	74,2
0.03	0,3200	0.0144	0
0.05	0,5150	0.0168	0
0.07	0,6980	0.0177	0
0.09	0,8780	0.0194	0
0.1	0,9610	0.0196	0
0.15	1,3330	0.0204	0

A Figura 24, a seguir, mostra a correlação entre as leituras efetuadas através do condutivímetro na solução do solo e os valores calculados através das leituras da TDR, no solo contaminado com as soluções de diferentes teores de sal. Estes valores foram obtidos com a sonda 18. Pode-se notar que o modelo apresenta uma correlação (R^2) próxima de 1.

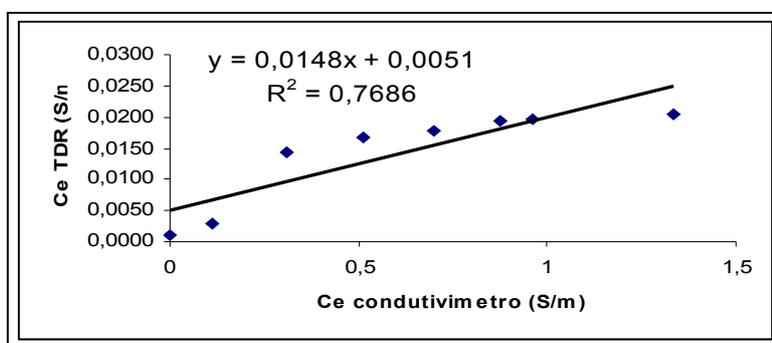


Figura 24 Análise de regressão para os valores obtidos através do condutivímetro e os valores calculados, considerando a sonda 18.

Para esta sonda todos os valores obtidos foram subestimados, exceto para a água destilada cujo valor de condutividade elétrica ficou acima do lido pelo condutivímetro.

4.8 Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 19, para as soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.

A Figura 25 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 19, leitura efetuada no ar e em curto circuito.

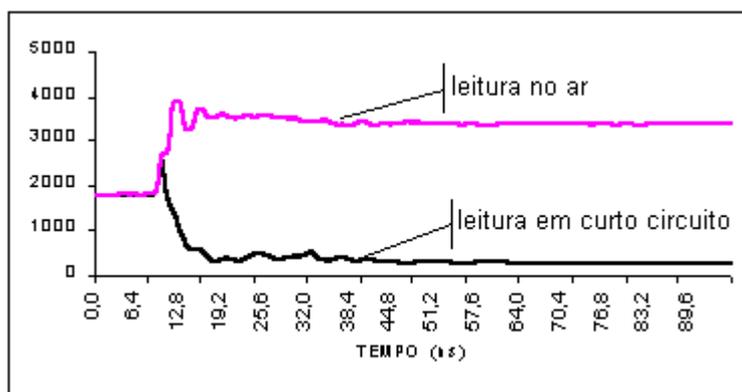


Figura 25 Sinal de pulso eletromagnético emitido pela TDR sonda 19, leitura obtida no ar e em curto circuito.

A Figura 26 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 19, leitura efetuada no ar, em curto circuito e em todas as soluções de diferentes concentrações.

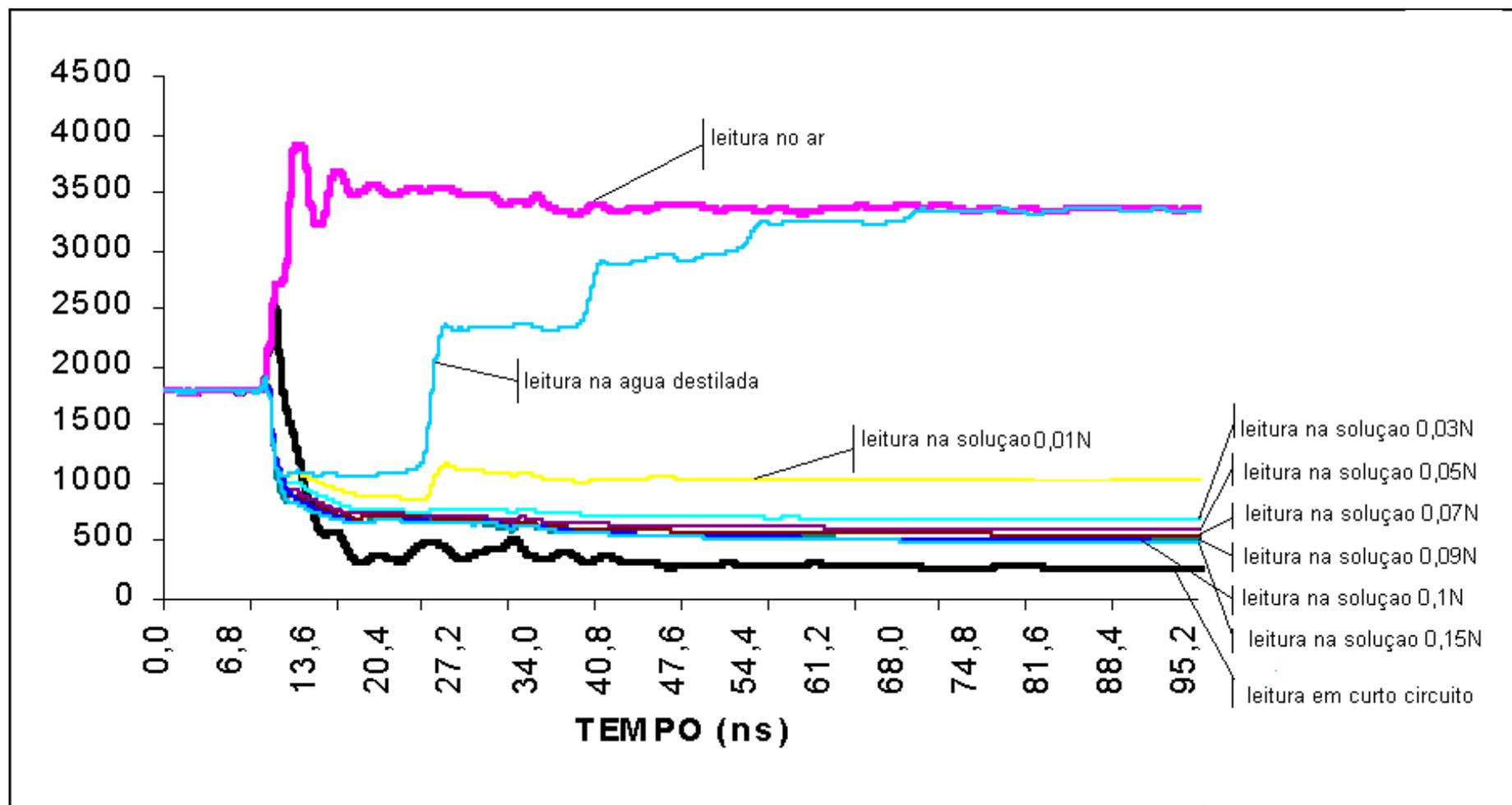


Figura 26 Resultados obtidos através da sonda 19 para soluções de diferentes concentrações.

4.9 Resultados das determinações de condutividade elétrica de soluções pelo equipamento TDR, através da equação de Giese-Tiemann, com a sonda 19.

Tabela 9 Cálculo da Condutividade Elétrica das Soluções com diferentes níveis de cloreto de sódio, com a sonda 19.

Concentração de NaCl (N)	CE lida através do condutímetro	Ce calculada pela equação 21	Ka lida pela TDR
Água destilada	0,0002	0.0003	73,9
0.01	0,1120	0.098	71,8
0.03	0,3200	0.0167	0
0.05	0,5150	0.0200	0
0.07	0,6980	0.0219	0
0.09	0,8780	0.0237	0
0.1	0,9610	0.0244	0
0.15	1,3330	0.0255	0

A Figura 27, a seguir, mostra a correlação entre as leituras efetuadas através do condutímetro na solução do solo e os valores lidos através da TDR, no solo contaminado com as soluções de diferentes teores de sal. Estes valores foram obtidos com a sonda 19. Pode-se notar que o modelo apresenta uma correlação (R^2) próxima de 1.

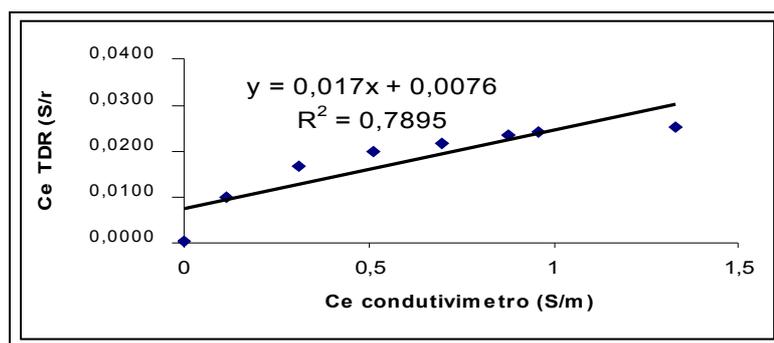


Figura 27 Análise de regressão para os valores de Ce obtidos através do condutímetro e os valores calculados, sonda 19.

No caso dessa sonda, pode ser verificado que novamente se tem a ocorrência de valores subestimados para os valores lidos com a TDR, exceto para a água destilada.

Através das figuras 20, 23 e 26 pode ser observado que ocorre crescente atenuação no sinal eletromagnético em todas as soluções, à medida que aumenta a concentração da solução salina. Nas mesmas figuras podemos observar que o equipamento TDR gerou gráficos das diferentes soluções muito próximas uns dos outros, devido ao fato do equipamento não possuir uma sensibilidade suficiente para produzi-los com maior clareza. Conseqüentemente a condutividade elétrica calculada para as soluções, geraram valores bem próximos uns dos outros, conforme pode ser verificado nas tabelas 7, 8 e 9. Também se pode verificar através das figuras 20, 23 e 26 que as leituras do sinal eletromagnético das sondas em curto circuito e no ar, formam um envelope, o qual delimitará uma região no interior da qual todas as leituras efetuadas surgem, em pleno acordo com o estudo de CASTIGLIONE & SHOUSE, 2003.

Também pode-se observar através das tabelas 7, 8 e 9 que o equipamento determinou os valores de constante dielétrica K_a somente para a água destilada e para a solução 0.01N, sendo que para as outras soluções foi acusado erro de leitura.

Através das figuras 21, 24 e 27 pode-se observar que os valores da correlação (R^2) próxima de 1, ocorreu para a sonda 16.

4.10 Resultados obtidos pelo equipamento TDR, através da sonda 16, no solo contaminado com soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.

A Figura 28 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 16, leitura efetuada no ar, em curto circuito e em todas as amostras de solo contaminadas com as soluções de diferentes concentrações.

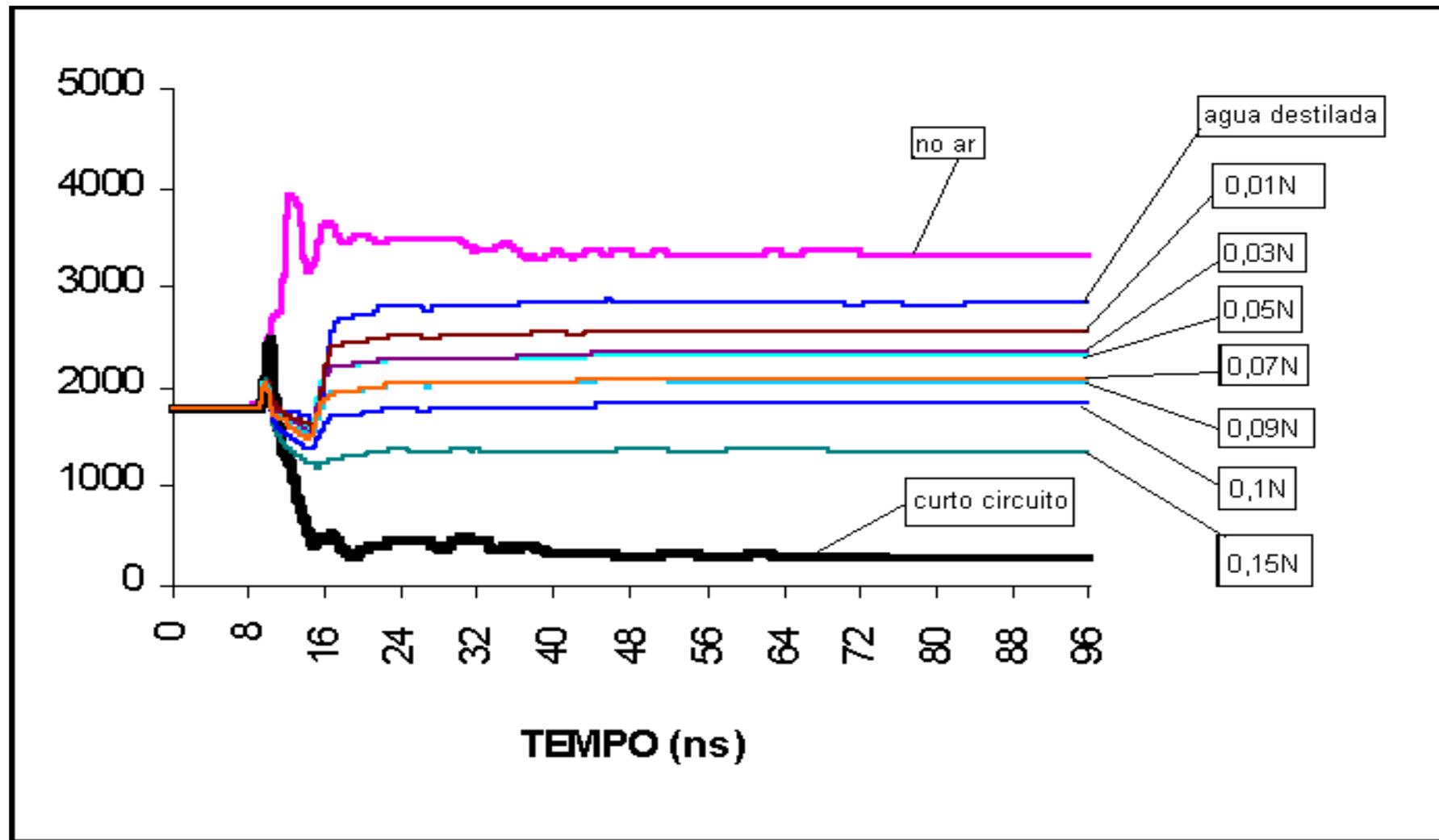


Figura 28 Resultados obtidos através da sonda 16 para o solo contaminado com as soluções de diferentes concentrações.

4.11 Determinação da condutividade elétrica (CE) usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann, para o solo contaminado com os diferentes teores salinos nas soluções, sonda 16.

A Tabela 10 apresenta os valores de Ce lida pelo condutivímetro na solução do solo contaminado com as soluções de diferentes teores de cloreto de sódio e os valores calculados.

Tabela 10 Cálculo da Condutividade Elétrica do Solo contaminado com os diferentes níveis de cloreto de sódio, sonda 16

Concentração de NaCl (N)	Ce lida através do condutivímetro	Ce calculada pela equação 21	Ka lida pela TDR
Água destilada	0,0171	0.0010	9.7
0.01	0,0189	0.0016	8.6
0.03	0,0296	0.0021	7.5
0.05	0,0452	0.0022	7,0
0.07	0,0577	0.0030	7,1
0.09	0,0646	0.0031	6.2
0.1	0,0855	0.0039	7,1
0.15	0,0936	0.0065	7,2

A Figura 29 mostra a relação linear existente entre a condutividade elétrica total do solo com a condutividade elétrica do extrato saturado do solo, a uma umidade constante. Este resultado concorda com os valores obtidos por FERRÉ et al., (1998). A equação de ajuste tem um coeficiente angular pequeno, com valor de 0,0001 S/m, o qual não tem um significado físico claro.

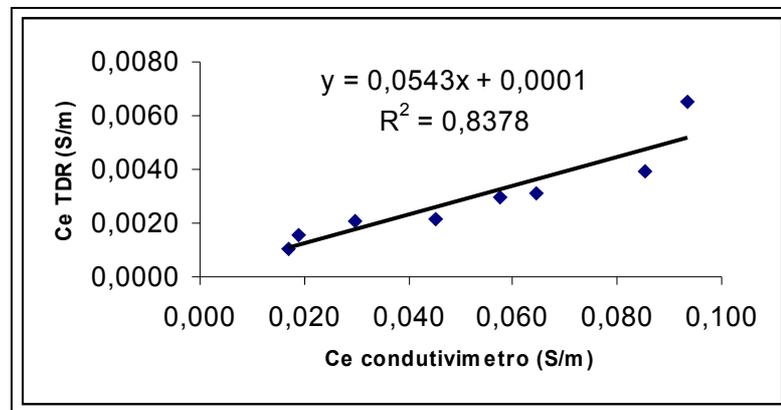


Figura 29 Análise de regressão para os valores lidos através do condutivimetro e os lidos com a TDR, para sonda 16.

4.12 Leituras obtidas pelo equipamento TDR, através da sonda 18, no solo contaminado com soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.

A Figura 30 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 18, leituras efetuadas no ar, em curto circuito e em todas as amostras de solo contaminadas com as soluções de diferentes concentrações.

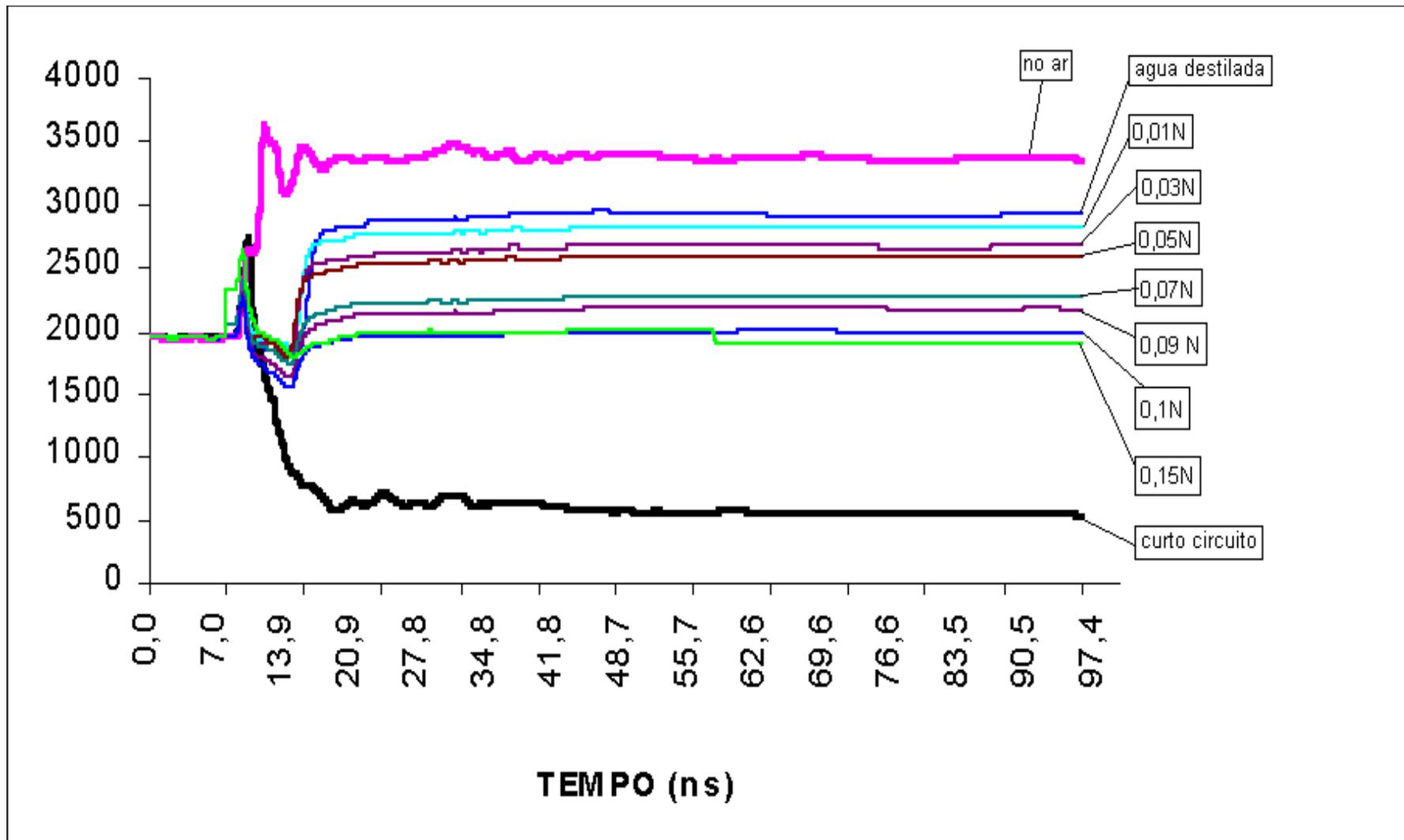


Figura 30 Resultados obtidos através da sonda 18 para o solo contaminado com as soluções de diferentes concentrações.

4.13 Determinação da condutividade elétrica usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann, para o solo contaminado com os diferentes teores salinos nas soluções, sonda 18.

A Tabela 11 apresenta os valores de C_e calculados e lidos através do condutivímetro na solução do solo.

Tabela 11 Determinação da condutividade elétrica do solo contaminado com os diferentes níveis de cloreto de sódio, sonda 18

Concentração de NaCl (N)	C_e lida através do condutivímetro	C_e calculada pela eq. 21	K_a lida pela TDR
Água destilada	0,0171	0.0013	11,6
0.01	0,0189	0.0015	8,9
0.03	0,0296	0.0018	8,4
0.05	0,0452	0.0020	6,9
0.07	0,0577	0.0029	7,1
0.09	0,0646	0.0032	7,0
0.1	0,0855	0.0038	7,1
0.15	0,0936	0.0042	7,0

A Figura 31 mostra a relação linear existente entre a condutividade elétrica total do solo com a condutividade elétrica do extrato saturado do solo, a uma umidade constante. Este resultado concorda com os valores obtidos por Ferré et al., 1998. A equação de ajuste tem um coeficiente angular pequeno, com valor de 0,0007 S/m, o qual não tem um significado físico claro.

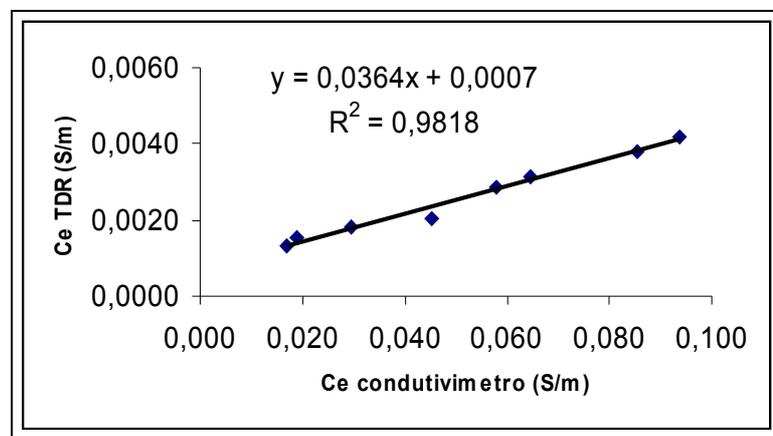


Figura 31 Análise de regressão para os valores lidos através do condutivímetro e os lidos com a TDR, para sonda 18.

4.14 Leituras obtidas pelo equipamento TDR, através da sonda 19, no solo contaminado com soluções de diferentes concentrações de cloreto de sódio.

A Figura 32 mostra a forma da função de onda capturada com a sonda 19, leituras efetuadas no ar, em curto circuito e em todas as amostras de solo contaminadas com as soluções de diferentes concentrações.

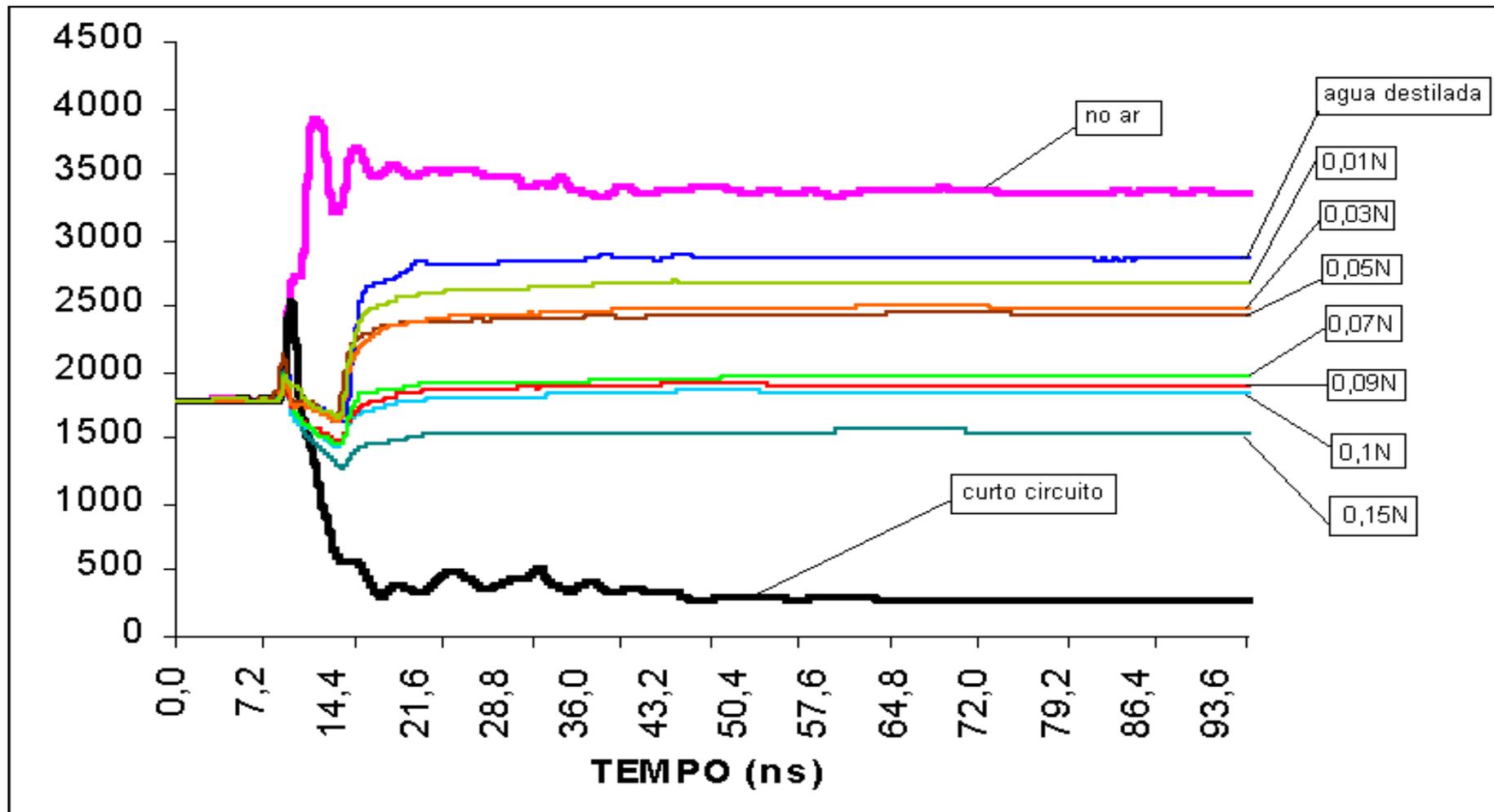


Figura 32 Resultados obtidos através da sonda 19 para o solo contaminado com as soluções de diferentes concentrações.

Pode-se observar através das figuras 28, 30 e 32, que conforme vai aumentando o nível de salinidade do solo, vai também aumentando a perda de energia, a qual pode ser vista através da altura do pulso refletido em solo, contendo solução salina em relação ao pulso refletido do solo contendo apenas água destilada, ou seja, ocorre uma atenuação do pulso refletido em relação ao solo contaminado com sal. Quanto maior o nível de sal, maior é a atenuação produzida no sinal refletido e, se aumentarmos ainda mais o nível de salinidade chega-se ao curto circuito.

Os resultados obtidos estão de acordo com as observações de vários autores (TOPP, et al., 1988; HEIMOVAARA, 1994; NOBORIO, 2001; WRAITH, et al., 2005; CASTIGLIONE & SHOUSE, 2003). A atenuação devido à solução de eletrólito depende tanto das características físicas da sonda como da concentração da solução.

As Figuras 28, 30 e 32 mostram que as leituras do sinal eletromagnético da sonda, em curto e no ar, formam um envelope, onde todas surgem dentro deste envelope. Essa formação de envelope está concordando com o estudo de CASTIGLIONE & SHOUSE, 2003.

As Tabelas 10, 11 e 12 demonstram que o equipamento mediu os valores de K_a para todos os níveis de salinidade no solo, sendo os valores próximos uns dos outros, já que o solo estava com o mesmo nível de umidade, 26,6%. As três sondas utilizadas no experimento foram calibradas em uma mesma coluna, podendo ser verificado no anexo c Tabela 15. Durante o período de calibração, a sonda 18 leu valores maiores da constante Dielétrica aparente no solo que as sondas 16 e 19. No solo contendo apenas água destilada, a sonda 18 também leu valor de K_a superior.

4.15 Determinação da condutividade elétrica usando Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), através da equação de Giese-Tiemann, para o

solo contaminado com os diferentes teores salinos nas soluções, sonda 19.

A Tabela 12 apresenta os valores de C_e calculados e lidos através do condutivímetro na solução do solo

Tabela 12 Cálculo da Condutividade Elétrica do Solo contaminado com os diferentes níveis de NaCl, sonda 19

Concentração de NaCl (N)	CE lida através do condutivímetro	Ce calculada pela eq. 21	Ka lida pela TDR
Água destilada	0,0171	0.0010	9.5
0.01	0,0008	0.0013	6.6
0.03	0,0296	0.0017	7.0
0.05	0,0452	0.0019	6.8
0.07	0,0577	0.0032	7,4
0.09	0,0646	0.0035	6.9
0.10	0,0855	0.0038	7,1
0.15	0,0936	0.0052	7,4

A Figura 33 mostra a relação linear entre a condutividade elétrica total ou aparente do solo (C_{e_a}) com a condutividade elétrica da solução do solo (C_{e_w}), obtida através de condutivímetro. Sabe-se que a condutividade elétrica aparente do solo depende da condutividade elétrica da superfície das partículas do solo (SILVA et al., 2005) e da umidade, a qual altera a condutividade elétrica da solução do solo. Tanto C_{e_a} quanto C_{e_w} podem ser empregados para estimativas de teores de nutrientes em um volume de solo submetido à fertirrigação.

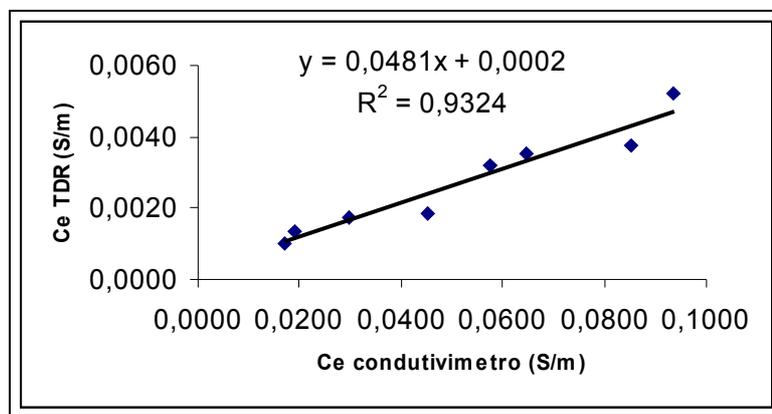


Figura 33 Análise de regressão para os valores lidos através do condutivímetro e através do equipamento TDR, com a sonda 19.

Verifica-se através das figuras 29, 31 e 33 que os valores de coeficiente R^2 mais próximos de 1, ocorreram para a sonda 18.

Deve-se considerar que o solo amostrado é um latossolo com alto teor de ferro, propriedade comum a solos que sofreram altos intemperismo e lixiviação e caracterizados pela presença de argilas e óxidos hidratados de ferro e de alumínio na subsuperfície. Nesses solos, os processos de intemperismo e lixiviação removeram parte da sílica dos minerais da subsuperfície, elevando a proporção de óxidos de ferro e de alumínio.

Como os fenômenos de transporte de solutos ainda representam um desafio (NOBORIO, 2006), a pesquisa por novas formas de calibração de sondas TDR para determinações de solutos oferece grande número de alternativas. Devido às dificuldades das determinações de valores absolutos de condutividade elétrica, tanto em soluções como em solos, as melhores alternativas são aquelas que se baseiam em medidas de fluxo relativo de solutos.

5 CONCLUSÕES

1) As sondas fabricadas de forma artesanal, sem a soldagem de capacitor e com o emprego de material nacional, custam em torno de 8 vezes menos do que as sondas importadas e oferecem bons resultados;

- 2) Para a calibração das sondas TDR em laboratório, ajustou-se um modelo polinomial cúbico para todas as sondas estudadas;
- 3) Foi verificado coeficiente de correlação satisfatório para as leituras de K_a , obtidas em relação a umidade volumétrica ($R^2=0,99$);
- 4) O sistema INFOSYS-TDR demonstrou ser uma boa ferramenta computacional e de fácil operacionalização, a qual facilita o emprego do equipamento TRASE por usuários principiantes, pois não é necessário conhecer especificidades do equipamento para operar o sistema, o qual gerencia todo o processo;
- 5) Os valores obtidos para as condutividades elétricas das soluções salinas não foram satisfatórios, pois o equipamento não demonstrou sensibilidade o suficiente para determinar os níveis de condutividade comparados aos resultados do condutivímetro;
- 6) Os resultados da condutividade elétrica total obtida no solo contaminado com as soluções de diferentes teores de salinidade mostraram que é possível determinar a condutividade elétrica usando um equipamento TRASE SYSTEM I. A relação linear obtida entre a condutividade elétrica aparente do solo (C_{e_a}) com a condutividade elétrica da solução do solo (C_{e_w}) mostra que é possível o emprego das medidas de condutividade elétrica para estimativas de concentração de íons em volumes de solo atingido por fertirrigação.
- 7) Todos os gráficos obtidos estão plenamente de acordo com os estudos de CASTIGLIONE & SHOUSE, 2003.
- 8) Ao se analisar os resultados das determinações de condutividade elétrica dos solos contaminados, deve-se lembrar que o solo amostrado é um latossolo com alto teor de ferro, fato que lhe confere características dielétricas peculiares.
- 9) Considerações finais:
Tendo em vista a amplitude do tema, aqui tratado, sugere-se que sejam aprofundados os estudos sobre os seguintes pontos:

- a) Efeitos de altos teores de Fe sobre medidas de condutividade elétrica com a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo;
- b) Efeitos do emprego de cabos com impedâncias e comprimentos maiores sobre as determinações de condutividade elétrica;
- c) Conseqüências da presença de heterogeneidades no solo sobre determinações com um equipamento TDR;
- d) Possibilidades do emprego de um equipamento TDR para medidas a longas distâncias e com grande número de sensores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L.T.C; COSTA, L. E. & ALBUQUERQUE E.P. Desenvolvimento e calibração de guias de ondas para TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p.173-176, 2003.

BACKER, J. M. & SPAANS, E.J.A. Comments on "Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns". **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.57, p.1395-1397, 1993.

BARROS, M. F. C.; FONTES, M. P. F.; ALVAREZ V. Reclamation of salt-affected soils in Northeast Brazil with application of mined gypsum and limestone. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n.1, p.59-64, 2004.

BLANCO, F. F. & FOLEGATTI, M. V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29., 2000, Fortaleza. **Anais...**Fortaleza: Universidade Federal de Pernambuco/Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000.

BUSATTA, O. J. **Desenvolvimento de um aplicativo para interfaceamento com um equipamento TDR.** 2005. 86f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

CARPENA, R. M.; REGALADO, C. M.; RITTER, A.; BENEDI, J. A.; SOCORRO, A. R. TDR estimation of electrical conductivity and saline solute concentration in a volcanic soil. **Geoderma**, New York, v. 124, n. 3, p. 399-413, 2005.

CASSEL, D.K.; KACHANOSKI, R.G.; TOPP, G.C. Practical considerations for using a TDR cable tester. **Soil Technology**, Washington, n.7, p.113-126, 1994.

CASTIGIONE, P.; SHOUSE P. J. The Effect of Ohmic Cable Losses on Time-Domain Reflectometry Measurements of Electrical Conductivity. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.67, p.414-424, 2003.

CICHOTA, R. **Calibração no campo de um equipamento de TDR segmentado para determinação da umidade do solo.** 2003. 121f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

COELHO, E.F. Numero e espaçamento entre hastes de guia de onda para medida da umidade do solo com TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.215-220, 2003.

COELHO, E.F.; Or, D. Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, p.2007-2016, 1996,

COELHO, E. F.; VELLAME, L. M.; COELHO, F. 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.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997, 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Solos Salinos**. www.cpap.embrapa.br 2001.

FERNANDES, J.M.F. **Variabilidade dos Parâmetros da Equação da Condutividade Hidráulica em Função da Umidade de Latossolo sob Condições de Campo**. 2002. 158f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

FERRÉ, P.A.; REDMAN, J.D. & RUDOLPH, D.L. The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of sand. **Water Resources Research**, Washington, v. 34, n. 5, p. 1207-1213, 1998.

HAMED, Y; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R. Soil Solution Electrical Conductivity Measurements Using Different Dielectric Technique. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, n. 4, p. 1071-1078, 2003.

HEIMOVAARA, T. J. Measurements of the Complex Dielectric Permittivity of Soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 30, n.2, p.189-199, 1994.

KACHANOSKI, R. G & PRINGLE, E. Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n. 56, p.47-52, 1992.

LEE, J.; HORTON, R.; NOBORIO, K.; JAYNES, D. B. Characterization of preferential flow soil columns using a vertical TDR probe. **Journal of Contaminant Hydrology**, Washington, n.51, p.131-144, 2001.

MALICKI, M. A. & WALCZAK, R. T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, n.50, p.505-514, 1999.

MARION, G. M. & BABCOCK, K.I. Predicting specific conductance and salt concentration in dilute aqueous solutions. **Soil Science**, New York, n.122, p. 181-187, 1976.

MATSURA, E.E., JUNIOR, A. J., GOMES, E. P., SOUZA, C. F. Aplicações da técnica da TDR na Agricultura. In: 1º Workshop sobre Aplicações da Técnica de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) na Agricultura, Campinas. **Anais....**Campinas: FEAGRI/UNICAMP, 2001.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 174p.

MOJID, A. M. & MALICK, M. A. Comments on Measurement of volumetric water content by TDR in saline soils. **European Journal of Science**, Amsterdam, n.50, p.181-183, 1999.

MORET, D.; ARRUE, J. L.; LOPEZ, M. V.; GRACIA, R. A new TDR waveform analysis approach for soil moisture profiling using a single probe. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 321, p. 163-172, 2006.

MUNÕZ-CARPENA, R. REGALADO, A.; RITTER, J. ALVAREZ-BENEDI, C. SOCORRO A. R. TDR Estimation of electrical Conductivity and Saline Solute Concentration in a Volcanic Soil. **Geoderma** 124 399-413 (2005).

NADLER, A.; DASBERG, S. & LAPID, I. Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.55, p.938-943, 1991.

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

NOBORIO, K.; KACHANOSKI, R. G.; TAN, C. S. Solute transport measurements under transient field conditions using time domain reflectometry. **Vadose Zone Journal**, Madison, n. 5, p. 412-418, 2006.

OR, D.; JONES, S. B.; VANSHAAR, J. R.; WRAITH, J. M. **WinTDR 6.0 Users Guide**, Disponível em: <<http://129.123.13.101/soilphysics/wintdr/documentatio.htm>>. Acesso em: 10, set. 2005.

PERIAGO, E. L., DELGADO, A. N., FIERROS, F. Groundwater contamination due to cattle slurry: modeling infiltration on the basis of soil column experiments. **Water Research**, v. 34, n. 3, p. 1017-1029, 2000.

PERSSON, M. Soil solution electrical conductivity measurements under transient conditions using time domain reflectometry. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.61, p.997-1003, 1997.

PREVEDELLO, C. L. **Física do Solo com problemas resolvidos**. Curitiba: SAEFS, 1996. 446 p.

QUEIROZ, S. O. P. **Método para Avaliação de Salinização do Solo sob condições de Ambiente Protegido**. 2004. 125f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera – Conceitos, Processos e Aplicações**. Barueri: Editora Manole, 2004, 478p.

RISLER, P. D.; WRAITH, J. M. & GABER, H.M. Solute transport under transient flow conditions using time domain reflectometry. **Soil Science Society American Journal**, Madison, n.60, p.1297-1305, 1996.

ROBINSON, D. A., JONES S. B.; WRAITH, J. M.; OR, D.; FRIEDMAN, S. P. A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 444-475, 2003.

RUDOLPH, D. L. & KACHANOSKI, R. G. Infiltration and solute transport experiments in unsaturated sand and gravel: experimental design and overview of results. **Water Resources Research**, v. 32, n. 3, p.519-532, 1996.

SANTOS, M. F. G.; OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE, L. F. Sodic soil treated with agricultural gypsum, urban waste compost and vinasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.3, p.307-313, 2005.

SILVA, A. I.; CONCIANI, W.; HERRMANN, P. S. Variabilidade da constante dielétrica do solo em função da sua umidade e classe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...Cuiabá**: Universidade Federal do Mato Grosso/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002.

SILVA, T. S. M.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S.; VELLAME, L. M.; Santana. G. 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.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORPORATION. **Trase Operating Instructions**. Santa Barbara, 1998, 119 p.

SOUZA, C. F. & MATSURA E. E. Avaliação de sondas de TDR Multi-Haste Segmentadas para Estimativa da Umidade do Solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.63-68, 2002.

SOUZA, C. F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento.** 2002. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

STEIN, J.; KANE, D. L. Reply. **Water Resources Research**, Washington, v.21,n.3, p.1057-1058, 1985.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de Solo, Plantas e outros Materiais.** Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1995. 172p.

TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo na calibração de um aparelho de TDR (Time-Domain Reflectometry).** 1997. 109f. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Washington, v.16, n.3, p.574-582, 1980.

TOPP, G. C.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W. D. And ZEGELIN, S. Determination of Electrical Conductivity Using Time Domain Reflectometry: Soil and Water Experiments in Coaxial Lines. **Water Resources Research**, Washington, v.. 24, n. 7, p. 945-952, 1988.

TRINTINALHA, M. A. **Avaliação da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) para determinação da umidade em Nitossolo Vermelho Eutroférico.** 2000. 64f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2000.

VILLWOCK, R. **Construção, Calibração e Avaliação de Sondas de TDR em Condições de Laboratório e de Campo.** 2003. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2003.

WRAITH, M. J.; ROBINSON, D. A. JONES, S. B.; LONG, S. S. Spatially Characterizing Apparent Electrical Conductivity and Water Content of Surface Soils with Time Domain Reflectometry. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, n. 46, p. 239-261, 2005.

ZEGELIN, S. J. and WHITE, I. Improved Field Probes for Soil Water Content and Electrical Conductivity Measurements Using Time Reflectometry. **Water Resources Research, Washington, v.25, n.11, p.2367-2376, 1989.**

ANEXOS

ANEXO B**Tabela 14** Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 1

Coluna	data	Sonda 02	Sonda 06	calculado θ (m ³ /m ³)
1	31/out	25,7	27	0,53
	01/nov	25,6	25	0,52
	02/nov	24,1	24,7	0,5
	03/nov	24,3	23,9	0,49
	04/nov	24,4	22,2	0,48
	05/nov	22,3	24,3	0,47
	06/nov	20,5	22,5	0,45
	07/nov	20	21,3	0,44
	08/nov	19,8	19,9	0,42
	09/nov	16,4	18,4	0,4
	10/nov	15,9	17,8	0,4
	11/nov	15,4	17,1	0,39
	12/nov	15,5	16,1	0,38

ANEXO C**Tabela 15** Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 2

Coluna	Data	sonda 08	sonda 16	sonda 18	sonda 19	Calculado θ (m ³ /m ³)
2	04/nov	30,8	30,8	33,9	32,7	0,51
	05/nov	29,5	29,2	32,4	29,2	0,51
	06/nov	28,5	27,6	30,6	27,9	0,49
	07/nov	27,1	25,3	28,3	25,7	0,45
	08/nov	25,9	24	27	24,5	0,43
	09/nov	24	22,2	24,8	22,6	0,41
	10/nov	23,2	21,4	23,6	21,5	0,4
	11/nov	22	20,3	22,4	20,5	0,39
	12/nov	21,4	19,8	21,7	20,5	0,38
	14/nov	19,1	18	19,7	18	0,36
	15/nov	18,4	17,4	18,7	17,4	0,35
	16/nov	17,8	16,8	18,1	16,8	0,34
	17/nov	17	16,1	17,1	16,1	0,34
	18/nov	16,6	15,8	16,8	15,8	0,33
	19/nov	16,2	15,4	16,4	15,4	0,33
	20/nov	15,5	14,6	15,8	14,8	0,32
	21/nov	14,3	13,3	14,6	13	0,31

22/nov	13,6	13,2	13,8	12,7	0,3
23/nov	12,6	12,8	13,1	12,2	0,29

ANEXO D

Tabela 16 Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 3

Coluna	data	sonda 05	Sonda 12	sonda 14	sonda 15	calculado θ (m ³ /m ³)
3	03/nov	28,9	29,6	27,6	28,6	0,51
	04/nov	26,6	28,2	26,8	26,6	0,47
	05/nov	26,4	28	27	26,3	0,47
	06/nov	25,5	27,2	26,5	25,5	0,46
	07/nov	24,2	26,2	25,7	24,6	0,44
	08/nov	23	25	24,5	23,4	0,43
	09/nov	21,2	23,1	22,9	21,7	0,4
	10/nov	20	21,6	21,7	20,3	0,39
	11/nov	19,2	20,6	20,7	19,5	0,38
	12/nov	18,4	19,9	19,7	18,8	0,37
	14/nov	16,6	18,2	18,2	17,2	0,35
	15/nov	16	17,4	17,4	16,5	0,34
	16/nov	15,7	16,9	17	15,9	0,34
	17/nov	15	16,1	16,2	15,4	0,33
	18/nov	14,7	15,9	15,9	15	0,33
	19/nov	14,3	15,4	15,5	14,6	0,32
	20/nov	13,9	15,1	15,2	14,3	0,32
21/nov	12,8	13,5	12,7	12,7	0,31	
22/nov			12,4		0,3	

ANEXO E

Tabela 17 Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 4

Coluna	Data	sonda 13	sonda 17	sonda 10	sonda 9	calculado θ (m ³ /m ³)
4	31/out	27	26,5	26	28,9	0,51
	01/nov	25,2	25,5	24,4	26,8	0,5
	02/nov	23,5	23,8	21,7	23,8	0,46
	03/nov	22,4	22	21,8	22	0,43

04/nov	21,1	21,8	21,2	21,8	0,42
05/nov	21,4	21,7	20,7	21,3	0,42
06/nov	21,4	21,1	20,1	20,4	0,41
07/nov	18,8	16,6	18,5	19,1	0,39
08/nov	18,8	16,5	16,8	17,5	0,37
09/nov	17,7	16,1	16,8	16,6	0,36
10/nov	16,9	15,7	16,1	16,1	0,35
11/nov	15,4	14,6	15,3	14,9	0,34
12/nov	15,4	14	14,5	14,3	0,34

ANEXO F

Tabela 18 Valores de Ka, lidos pelo equipamento TDR durante a calibração das sondas, coluna 5

Coluna	Data	Sonda1	Sonda3	Sonda4	Sonda7	calculado θ (m ³ /m ³)
5	31/out	25,7	28,2	30,6	29,7	0,51
	01/nov	25,6	25,2	27,1	25,3	0,49
	02/nov	24,1	23,4	25,2	23,4	0,47
	03/nov	22,9	22,6	23,9	22,4	0,45
	04/nov	22,5	22,5	22,7	21,3	0,43
	05/nov	22,3	22,2	22,2	22	0,43
	06/nov	20,5	21,3	19,5	21,2	0,42
	07/nov	20	20,5	19	20	0,4
	08/nov	19,8	19,2	18,8	18,8	0,38
	09/nov	16,4	17,8	18,4	17,8	0,36
	10/nov	15,9	17,3	16	17,3	0,35
	11/nov	15,4	16,9	15,5	16,8	0,34
	12/nov	15,5	16,2	1,4	16	0,34
	14/nov		14,8	13,6	14,1	0,32
	15/nov		14,8	12,5	13,6	0,31
	16/nov		14	11,8	13,1	0,31
	17/nov		13,5	11,2		0,3
	18/nov		13			0,3
	19/nov		12,5			0,29
	20/nov		12,1			0,29
	21/nov		11,7			0,28
	22/nov		10,6			0,27

ANEXO G. Determinação da Condutividade Elétrica do Solo.

A condutividade Elétrica indica o teor de eletrólitos ou sais dissolvidos na solução do solo. A concentração de sais varia com o teor de umidade do solo. Devido a dificuldade de determinar as concentrações efetivas de sais em teores baixos de umidade do solo, utiliza-se o extrato de saturação para estas avaliações, correlacionando-se os resultados obtidos com o crescimento das plantas.

O extrato de saturação representa o menor teor de umidade do solo que pode ser repetido com certa segurança e relativa facilidade, possibilitando a coleta de volumes razoáveis de líquido para análises Rhoades, (1982), citado por TEDESCO et al., (1995). Através do extrato de saturação também pode ser obtido o pH do solo.

Obtenção do extrato de saturação do solo.

Material

- 1 - Cápsulas de porcelana ou aço inoxidável de tamanho adequado.
- 2 - Filtros de Büchner, aparelho de pressão (100lb) ou centrífuga.
- 3 - Filtro Millipore.

Procedimento

- 1- Tarar a cápsula com a espátula (Ta) e pesar na cápsula 200-400g de solo seco (TFSA). Não utilizar solo seco a 105 °C.
- 2- Adicionar água destilada até próximo ao ponto de saturação do solo. Utilizar espátula para misturar o solo.
- 3- Deixar a mistura em repouso por 2-3 horas. Para o solo absorver a água.
- 4- Adicionar mais água até atingir uma pasta solo-água uniformemente saturada. Misturar bem com a espátula. Neste ponto a pasta apresenta uma superfície brilhante.

- 5- Cobrir e deixar durante a noite. Após este período, ver se a pasta ainda está em ponto de saturação. Misturar bem novamente. Ou por 4 horas no mínimo. Não deve acumular água na superfície.
- 6- Pesar a pasta na cápsula (P_2). Com a cápsula.
- 7- Deixar em repouso mais 4 horas, transferir para filtro de Büchner contendo papel de filtro de poros finos e extrair a água com vácuo até começar a passar ar pelo solo. Um extrator de umidade por pressão pode também ser usado ou uma centrífuga (10 000 rpm).
- 8- Se a porção inicial do filtrado sair turva, refiltrar.
- 9- Medir imediatamente o pH e a CE do extrato e diluir 2x com água destilada. Utilizar proveta. A diluição é para evitar a precipitação de CaCO_3 em solos alcalinos.
- 10-Guardar o restante do extrato para análises químicas, se necessárias.