



UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS CERRO LARGO
CURSO DE AGRONOMIA

LETÍCIA MAIARA GALLECZKA

**AVALIAÇÃO DE SONDAS ARTESANAIS PARA MEDIDA DA UMIDADE
VOLUMÉTRICA DO SOLO COM EQUIPAMENTO DE TDR**

CERRO LARGO-RS
2021

LETÍCIA MAIARA GALLECZKA

**AVALIAÇÃO DE SONDAS ARTESANAIS PARA MEDIDA DA UMIDADE
VOLUMÉTRICA DO SOLO COM EQUIPAMENTO DE TDR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título bacharel em Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser

CERRO LARGO-RS

2021

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Galleczka, Letícia Maiara

Avaliação de sondas artesanais para medida da umidade volumétrica do solo com equipamento de TDR / Letícia Maiara Galleczka. -- 2021.

41 f.:il.

Orientador: Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria Douglas Rodrigo Kaiser

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de Bacharelado em Agronomia, Cerro Largo, RS, 2021.

1. Reflectometria no Domínio do Tempo. 2. Latossolo Vermelho. 3. Calibração. 4. Constante Dielétrica. I. Kaiser, Douglas Rodrigo, orient. II. Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

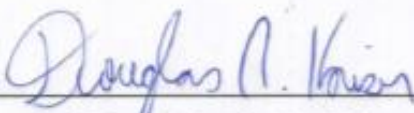
LETÍCIA MAIARA GALLECZKA

**AVALIAÇÃO DE SONDAS ARTESANAIS PARA MEDIDA DA UMIDADE
VOLUMÉTRICA DO SOLO COM EQUIPAMENTO DE TDR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul, como requisito para obtenção do título bacharel em Agronomia.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 10/05/2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Douglas Rodrigo Kaiser - UFFS
Orientador



Prof. Dr. Renan Costa Beber Vieira – UFFS
Avaliador



Prof. Dr. Mário Sergio Wolski – UFFS
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, principalmente aos meus pais, Silvestre e Tecla, por todo auxílio prestado durante essa jornada, tornando possível a conclusão dessa etapa.

Agradeço ao meu namorado Rafael, por todo apoio.

Aos meus colegas de faculdade, Ritieli e Leandro, pela amizade.

A todos os professores do curso de Agronomia da Universidade Federal da Fronteira Sul *campus* Cerro Largo, por todos os ensinamentos, em especial ao professor Dr. Douglas Rodrigo Kaiser pela orientação, conhecimentos repassados e paciência. Fica aqui minha gratidão.

RESUMO

A água é importante para a agricultura, sendo imprescindível o manejo racional para o desenvolvimento das plantas. Existem vários métodos indiretos para medir o conteúdo de água no solo, fornecendo a umidade instantaneamente, como a técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), que mede a constante dielétrica do meio em que está inserida. Porém, esses equipamentos são importados, com elevado custo de aquisição e possuem necessidade de calibração. Assim, o presente trabalho teve como objetivo testar a eficiência de sondas de TDR confeccionadas com materiais nacionais e verificar a efetividade das equações de calibração de Top (1980) e Ledieu (1986), para um Latossolo Vermelho da área experimental da Universidade Federal da Fronteira Sul, *campus* Cerro Largo. As sondas artesanais foram semelhantes as sondas padrão, quando comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, nas condições de solo saturado, condição de umidade de solo na capacidade de campo, condição de umidade do solo no ponto de murcha permanente e condição de umidade abaixo do ponto de murcha permanente, onde para essa condição utilizou-se o solo seco ao ar, comprovando sua eficiência, no entanto, as equações de calibração não foram adequadas, necessitando uma nova equação a partir dos dados obtidos para uma maior precisão do conteúdo de água do solo.

Palavras-chave: Conteúdo de água do solo, Latossolo Vermelho, calibração, constante dielétrica.

ABSTRACT

Water is important for agriculture, and rational management is essential for plant development. There are several indirect methods to measure the water content in the soil, providing moisture instantly, such as the Time Domain Reflectometry (TDR) technique, which measures the dielectric constant of the medium in which it is inserted. However, this equipment is imported, with a high acquisition cost and needs calibration. Thus, the present work had as objective to test the efficiency of TDR probes made with national materials and to verify the effectiveness of the calibration equations of Top (1980) and Ledieu (1986), for an Latossolo Vermelho of the experimental area of the Federal University of Fronteira Sul, Cerro Largo campus. The artisanal probes were similar to the standard probes, when compared by the Tukey test at 5% significance, in the conditions of saturated soil, soil moisture condition in the field capacity, soil moisture condition at the permanent wilt point and condition of humidity below the permanent wilt point, where air-dried soil was used for this condition, proving its efficiency, however, the calibration equations were not adequate, requiring a new equation based on the data obtained for greater precision of the soil water content.

Keyword: Conteúdo de água do solo, Latossolo Vermelho, calibration, dielectric constant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Tipos de sondas.....	22
Figura 2 - Sonda artesanal em processo inicial de construção, sonda artesanal em fase final de construção e sonda original, da esquerda para direita.	24
Figura 3 - Processo de fabricação da Sonda Artesanal, na qual a mesma se encontra no molde de silicone, com resina isoftálica aguardando secagem.....	25
Figura 4- Curva de retenção de água do solo utilizado para avaliar a eficiência das sondas artesanais. CC: conteúdo de água na capacidade de campo; PMP: conteúdo de água no ponto de murcha permanente.	26
Figura 5 - Solo acondicionado em tubos de PVC, com dimensões de 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro.	27
Figura 6 - Solo saturado por ascensão capilar.	28
Figura 7 - Solo na mesa de tensão para determinação da condição de umidade na capacidade de campo.	29
Figura 8 - Acréscimo de água no solo (A- homogeneização do solo com acréscimo de água; B- montagem dos cilindros com o solo).	30
Figura 9 - Modelo polinomial que teve o melhor ajuste ao conjunto de dados de umidade volumétrica real e constante dielétrica do meio.	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desempenho dos métodos de avaliação da umidade do solo pelo equipamento de TDR, com o modelo de Topp embutido no próprio equipamento. ...	33
Tabela 2 - Desempenho dos métodos de avaliação da umidade do solo pelo equipamento de TDR, com o modelo de Ledieu.	34
Tabela 3 - Desempenho dos métodos de avaliação da umidade do solo pelo equipamento de TDR, pelo modelo proposto na figura 9.	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 FATORES QUE AFETAM A RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	14
2.2 MÉTODOS E TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	17
2.2.1 Método gravimétrico.....	17
2.2.2 Técnica da sonda de nêutrons	17
2.2.3 Blocos de resistência elétrica	18
2.2.4 TDR- (Time domain reflectometer)	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5 CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A água é importante para a agricultura, onde seu manejo racional é imprescindível para o desenvolvimento das plantas, evitando a falta ou excesso. Deste modo, torna-se necessário o conhecimento da dinâmica e distribuição da água no solo, já que está estritamente ligado às propriedades do sistema solo-água-planta. O conhecimento desse domínio é essencial para uma agricultura sustentável de sucesso (SOUZA *et al.*, 2006).

Segundo dados da Agência Nacional das Águas, o Brasil possui grande disponibilidade de recursos hídricos, estando entre os 10 países com maior área equipada para irrigação, ocupando 6,95 milhões de hectares irrigados, , onde o maior uso de água no Brasil é destinado a irrigação, responsável pela retirada de 46% da água nos corpos hídricos. Para aumentar a eficiência do uso da água, é preciso melhorar os sistemas de gestão dos recursos hídricos, sendo necessário melhorar o manejo do solo através do desenvolvimento de pesquisas para melhor compreender a dinâmica da água nos diferentes tipos de solos, manejos e culturas.

A disponibilidade de água no solo afeta diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas e controla a resistência a compactação e aeração do solo, sendo necessário assim um equipamento capaz de permitir o monitoramento espacial e temporal da umidade do solo para compreender a interação destes fatores (KAISER *et al.*, 2010).

Atualmente existem vários métodos indiretos para medir o conteúdo de água no solo, fornecendo os valores de umidade instantaneamente, sendo essa uma grande vantagem em relação aos métodos diretos que são trabalhosos e demorados. Porém, os equipamentos utilizados para medir o conteúdo de água no solo são importados, fator esse que eleva o custo de aquisição, além de necessitarem calibrações para as condições dos solos tropicais do Brasil (REICHARDT, TIMM, 2012).

A reflectometria no domínio do tempo (TDR), é uma das técnicas indiretas que mais tem crescido nos últimos anos, principalmente em projetos de pesquisa relacionados à dinâmica da água no solo. A medida de umidade do solo usando essa técnica baseia-se no princípio da velocidade de deslocamento de um pulso eletromagnético num meio, sendo esta dependente da constante dielétrica do mesmo. No solo, a constante dielétrica da água (80), é muito elevada em relação à de outros

componentes, como o ar presente nos poros (1) e minerais (3 a 5). A velocidade de deslocamento do pulso é comandada pelo conteúdo de água no solo (MEDEIROS *et al.*, 2007).

A técnica do TDR demonstra muitas vantagens quando comparada com os demais métodos, pois não utiliza materiais radioativos como os usados nas sondas de nêutrons, sendo, portanto, um equipamento seguro, permitindo medir a umidade com precisão, em qualquer profundidade, não estando limitada a medidas superficiais. No mercado existe várias marcas e modelos de sensores, que permitem realizar inúmeras medidas no mesmo local, sem destruir a amostra de solo. Alguns modelos permitem automatização das leituras e transmissão em tempo real para receptores dos dados em laboratório (SOUZA, MATSURA, 2002).

A principal desvantagem dos equipamentos de TDR é o custo elevado do aparelho e das sondas utilizadas no monitoramento da umidade do solo (SANT'ANA *et al.*, 2012). Para acompanhar a umidade no perfil do solo e reduzir erros referentes a variabilidade espacial em estudos da dinâmica da água no solo ou no manejo da irrigação onde é necessário grande quantidade de sondas de TDR, fato este que tem inviabilizado o uso pelo elevado custo de aquisição (SOUZA *et al.*, 2006). Os expressivos preços dessas guias de onda industriais, têm limitado o uso desses equipamentos (COELHO *et al.*, 2006). Como alternativa, tem surgido o uso de sondas de construção artesanal, elaboradas com custos relativamente baixos, que quando devidamente calibradas funcionam semelhante as guias de onda industriais originais (VILLWOCK; TAVARES; VILAS BOAS, 2004; COELHO *et al.*, 2005).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Construir sondas artesanais para um TDR (modelo 6050X3K5B MiniTrase), com uso de materiais nacionais para obtenção da umidade volumétrica de um Latossolo Vermelho com textura muito argilosa.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho de sondas de TDR artesanais para serem usadas na estimativa de umidade do solo.
- Calibrar as sondas artesanais para um Latossolo Vermelho com textura muito argilosa, em condições de laboratório.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FATORES QUE AFETAM A RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O cultivo do solo promove alterações em seus atributos físicos, principalmente na estrutura, favorecendo assim o desenvolvimento das culturas, a curto prazo. No entanto, o cultivo intensivo ao longo do tempo pode degradar os solos, causando alterações na retenção de água, diminuindo a produtividade e potencializando os custos de produção. Nesse sentido, os atributos que influenciam a retenção de água no solo vêm sendo intensamente estudados, por ser a água um dos fatores limitantes à produtividade das culturas (BEUTLER *et al.*, 2002).

A retenção de água no solo é a capacidade do solo em manter a água da chuva ou irrigação (KLEIN, 2015). A quantidade de água disponível às plantas está entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade de campo refere-se à quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso é drenado, onde os macroporos estão livres de água e os microporos cheios. O ponto de murcha permanente, é o teor de água no solo no qual as plantas apresentam perda de turgência e não se recuperam mais, é portanto, o teor mínimo de água disponível (KLEIN, REICHERT, REINERT, 2006).

A capacidade de um solo em reter água depende de fatores como a textura, mineralogia, porosidade e estrutura, onde estes determinarão os processos de capilaridade e adsorção, formando assim o que conhecemos por potencial mátrico do solo, onde a água, as frações minerais (argila, silte e areia) e orgânicas (matéria orgânica do solo) exercem interações de adesão (LEPSCH, 2011).

A textura é uma das características mais estáveis e representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais, quanto ao tamanho (argila, silte, areia), sendo importante para a descrição, identificação e classificação do solo, com conotação quantitativa (FERREIRA, 2010). É a propriedade que exerce maior influência na retenção de água, não sendo modificada com o tempo, exceto ao considerar milênios de anos e a ação do intemperismo (KLEIN, 2015).

A capacidade de água disponível para às plantas é maior nas classes que apresentam maior presença de argila e silte, devido à área superficial específica dessas partículas serem maior. Assim, solos menos intemperizados e com maior proporção argila/silte conseguem reter mais água, como nos minerais 2:1 (REICHERT *et al.*, 2009). No entanto, maior capacidade de armazenamento de água, pode não

representar maior potencial de água extraível às plantas. Fato este é observado por Carlesso e Santos (1999), onde em seu estudo com três solos de texturas diferentes, constataram que para uma mesma profundidade do solo e em condições de déficit hídrico, o solo de textura franco-arenosa apresentou maior capacidade de armazenamento de água disponível às plantas de milho, e que o maior armazenamento total de água no perfil de solos de textura argilo-pesada e franco-argilos-siltosa não representou maior disponibilidade de água às plantas de milho.

As argilas apresentam papel de máxima importância, por serem as menores partículas do solo, apresentam poros de tamanho muito pequeno entre as partículas, mas em quantidade numerosa, fazendo com que quanto maior o teor de argila, maior a intensidade de retenção de água, capacidade de troca, resistência à erosão e fixação de fósforo (RESENDE *et al.*, 2007).

Para altos teores de água no solo, os fenômenos capilares são importantes na retenção, onde depende da densidade do solo e da porosidade, enquanto que para teores menores de água, o fenômeno dominante é de adsorção, dependendo mais da textura e superfície específica do solo (BEUTLER *et al.*, 2002).

Assim como a quantidade, a qualidade das partículas de argila influencia no montante de água que um solo pode reter. Exemplo são as argilas esmectitas (como a montmorilonita) que adsorvem tanta água ao ponto de se expandirem quando estão molhadas e se fendilham quando secam. Solos ricos em matéria orgânica também retêm muita água, porque são partículas de tamanho muito reduzido, que apresentam superfície específica inversamente proporcional, e assim, maior energia para reter água (LEPSCH, 2011).

A matéria orgânica é um elemento que desempenha importante papel nas características físicas do solo, onde junto com a textura influenciam na agregação do solo, aumentando o diâmetro médio dos agregados, bem como, sua estabilidade, contribuindo fortemente nos fluxos de água e ar no solo (SUZUKI *et al.*, 2014).

O conteúdo de matéria orgânica tem efeito positivo na retenção de água na capacidade de campo, isso se deve ao efeito indireto da argila, silte e densidade aparente, indicando assim, que em solos com maior teor de argila, há mais matéria orgânica, frações essas que contribuem aditivamente na retenção de água pela matéria orgânica (REICHERT *et al.*, 2009).

O Brasil possui grande variedade de solos em sua extensão, com ocorrência de 13 classes de solo, decorrente dos diversos processos de formação, com predominância dos Latossolos, Argissolos e Neossolos (SANTOS *et al.*, 2018). A composição mineralógica das partículas tem presença no comportamento físico dos solos, e embora o Brasil apresente várias classes de solo, a classe dos Latossolos ocupa mais de 50% do território, sendo a Caulinita, Gibbsita, Goethita e Hematita, em diferentes proporções, os principais constituintes da fração argila desses solos (FERREIRA, 2010).

O tipo de estrutura determina o tipo de solo e interfere na retenção de água, como a estrutura em blocos, reflexo do ajuste face a face das placas de argila silicatada, estaria associado aos solos menos intemperizados e a estrutura granular, consequência da ausência do ajuste anterior, presente nos solos mais intemperizados, ricos em gibbsita (FERREIRA, 2010).

Dentre as principais características dos solos, está a porosidade, onde todo solo possui poros, porém, em número, tamanho, distribuição e continuidade variáveis. Esses poros são divididos em microporos e macroporos, menores e maiores de 0,05mm de diâmetro, respectivamente. Assim, espera-se que, solos argilosos apresentem grande microporosidade, ao contrário, solos arenosos, apresentem grande macroporosidade (RESENDE *et al.*, 2007). Fato este foi observado em estudo realizado por Reichert *et al.*, (2009), onde em solos mais densos o volume dos macroporos diminuíram, afetando a retenção de água na capacidade de campo. Com o aumento do teor de areia, houve aumento na densidade aparente, diminuindo a retenção de água, devido ao efeito indireto da distribuição do tamanho das partículas. Portanto, solos mais arenosos e densos, com maior macroporosidade e menor microporosidade que os solos argilosos, tem menor capacidade de reter água.

O armazenamento e a retenção de água sempre são maiores nos solos argilosos do que nos solos arenosos. Os solos arenosos, por apresentarem grande macroporosidade, perdem rapidamente a água retida por evaporação e drenagem, ao contrário, os solos argilosos, por terem maior microporosidade, retêm volumes mais elevados de água por mais tempo em capacidade de campo e em ponto de murcha permanente, resultando em mais água disponível para as plantas, (STRECK *et al.*, 2018).

No entanto, os atributos físicos do solo podem sofrer alterações devido as práticas de manejo. Exemplo disso é o uso cada vez mais intensivo do solo com a utilização de máquinas pesadas, promovendo assim efeitos negativos na estrutura, como a compactação do solo, onde essa modificação pode causar redução da porosidade, aumento da densidade e permeabilidade do solo, diminuindo o teor de água e aumentando a resistência do solo a penetração, fazendo com que as raízes encontrem impedimento mecânico, restringindo o crescimento do volume radicular e reduzindo o acesso à água e nutrientes, consequentemente, afetando a produtividade das culturas (COLLARES *et al.*, 2008).

2.2 MÉTODOS E TÉCNICAS PARA DETERMINAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

2.2.1 Método gravimétrico

Esse método é tido como padrão, representando resultados precisos a um custo relativamente baixo, quando usado como técnica laboratorial. Porém, para medidas no campo, pode haver redução da precisão dos resultados, devido ao acondicionamento e transporte das amostras, além de poder causar interferência no local de estudo, quando se trata de uma área pequena (SOUZA, MATSURA, 2002).

O procedimento se dá por meio da coleta de uma amostra de solo, sendo posteriormente pesada e colocada em estufa por 105°C por 24h, sendo novamente pesada, onde a diferença entre massa de água e massa de solo seco determina a quantidade de água presente na amostra (REICHARDT, TIMM, 2012). Apresentando assim, a limitação da necessidade de utilização de estufa e a demora para obtenção da umidade do solo (KLEIN, 2012).

2.2.2 Técnica da sonda de nêutrons

Essa técnica *in situ* é baseada na capacidade dos núcleos de hidrogênio presentes no solo, principalmente os d'água e da matéria orgânica de disparar e assim reduzir a velocidade dos nêutrons, onde esta interferência é contabilizada pelo instrumento (NETO, 1994).

O princípio de funcionamento é simples, consiste na perda de energia de nêutrons rápidos por meio de choques com núcleos no sistema solo-água-planta. Normalmente, utiliza-se uma relação empírica para a contagem de nêutrons térmicos ou moderados e a umidade do solo (FALLEIROS, 1994).

Em experimento realizado, na profundidade de 1,00 m, a sonda de nêutrons, mostrou-se eficiente na determinação da umidade do solo quando comparada ao tensiômetro e TDR. Apresenta como destaque a sua natureza não-destrutiva. Porém, sua utilização é restrita, devido a presença de fonte radioativa, razão pela qual há necessidade de se observar e conhecer as leis e normas que fiscalizam e regulamentam o uso desses materiais, sendo esta uma grande desvantagem quando comparado a outras técnicas, por exemplo, a reflectometria no domínio do tempo (TDR) (TEIXEIRA *et al.*, 2005).

2.2.3 Blocos de resistência elétrica

Esses instrumentos contêm um par de eletrodos dentro de um bloco de gesso ou de náilon, quando inseridos no solo tendem a entrar em equilíbrio. Nessas condições, o potencial de água no solo é igual ao potencial da solução dentro do bloco. Então, se estabelece a curva de calibração, correlacionando os valores da resistência elétrica entre os eletrodos dentro do bloco, com a umidade do solo (REICHARDT, TIMM 2012).

As vantagens desse método é o baixo custo de implantação, possibilidade de se trabalhar em ampla faixa de aplicação (50 a 1500 KPa), além da facilidade de fabricação. Como desvantagens está a necessidade periódica de calibração e individual de cada sensor, devido a interferência da temperatura do solo e da concentração da solução do solo (CALBO, 2005).

2.2.4 TDR- (Time domain reflectometer)

Dentre os métodos desenvolvidos recentemente para medição de umidade do solo, está a reflectometria no domínio do tempo (TDR), onde seu funcionamento baseia-se na relação existente entre a permissividade (propriedade dielétrica) e a umidade do solo (ANDRADE *et al.*, 2003).

A técnica TDR foi introduzida na década de 60, por Fellner-Fedegg, para medir a permissividade complexa dos líquidos (Gomide,1998). Desde então, esta técnica passou a ser usada para medição da constante dielétrica de diversos materiais, inclusive o solo. No início da década de 80, foi empregada para determinação de propriedades físicas do solo, quando se verificou que a constante dielétrica possuía relação acentuada com o teor de água e, em menor grau, com a composição e densidade. Desde então esse método foi desenvolvido para medição do teor de

umidade do solo por meio da determinação da constante dielétrica, juntamente com equipamentos testadores de cabos elétricos associados a outros equipamentos eletrônicos (PEREIRA *et al.*, 2006).

Para medidas precisas da umidade e condutividade elétrica do solo à campo e em laboratório, tem-se utilizado a técnica de TDR, a qual necessita de ajuste de uma equação de calibração para cada tipo de solo, um importuno que é aceito em virtude às vantagens que apresenta em relação a outros métodos (SOUZA, MATSURA, 2002).

A adoção da reflectometria no domínio do tempo (TDR) em substituição a outros métodos, deve-se as vantagens que essa ferramenta apresenta, como o não uso de radiação ionizante, método não destrutivo, precisão, possibilidade de automação e acoplamento de dispositivos multiplicadores de leituras (COELHO; OR, 1996).

A técnica de TDR é baseada na mensuração do tempo (t) de deslocamento de onda em nanossegundos (ns) de uma sequência de pulsos em uma linha de transmissão de micro-ondas (antena), composto de duas ou mais hastes de comprimento conhecido que são inseridos no solo (TOMMASELLI; BACCHI, 2001).

O equipamento de TDR é composto por um testador de cabo e por guias de onda ou sondas de TDR que são basicamente um prolongamento de um cabo coaxial de 50 Ohms, geralmente conectado a três hastes de aço inoxidável, onde a malha externa (negativo), conecta-se a duas hastes externas, e o fio interno (positivo), à haste central (Sant'Ana *et al.*, 2012).

O componente que possui maior influência na constante dielétrica aparente do solo é a água (K_a 81), muito maior que as partículas minerais e orgânicas (2-7), de modo que quanto maior o K_a , maior o tempo necessário para percurso do pulso elétrico nas hastes (Kaiser *et al.*, 2010).

A grande disparidade do valor da constante dielétrica da água em relação a outros materiais presentes no solo, permite o uso dessa técnica, pois o retardamento do pulso se deve, em grande parte ao conteúdo existente de água no solo (Tommaselli; Bacchi, 2001), onde pode ser calculada pela seguinte equação:

$$K_a = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2$$

K_a = Constante dielétrica

c = Velocidade da luz em centímetros por nanosegundos

t = Tempo que a onda leva para percorrer a haste

L = Comprimento da haste (m).

Uma grande dificuldade no uso da reflectometria no domínio do tempo para determinar a umidade do solo é a indispensabilidade de calibração, (VILLWOCK; TAVARES; VILAS BOAS, 2004). Os modelos ajustados têm sua aplicabilidade limitada às condições locais, devido às variáveis secundárias como teor de sais solúveis, matéria orgânica, textura, temperatura entre outras (KAISER *et al.*, 2010; PEREIRA *et al.*, 2006).

Pereira *et al.*, (2006), menciona que a dificuldade de se encontrar um modelo padrão de calibração consiste, entre outros fatores, nas diferenças particulares existentes entre os solos, mostrando assim, a necessidade de diferentes calibrações para solos minerais ferrosos ou orgânicos. O mesmo é observado por Robinson *et al.*, (1994), onde através de seus estudos, constataram que a presença de minerais de ferro e minerais de titânio podem influenciar na determinação da constante dielétrica obtida por meio da TDR, quando usado a calibração padrão do aparelho, e conseqüentemente, superestimar o conteúdo de água presente no solo, isso devido a presença desses óxidos interferirem aumentando o tempo de percurso da onda.

Uso de modelos empíricos de calibração pressupõe que a constante dielétrica aparente é dependente apenas do conteúdo de água no solo. Esses modelos são singelas relações funcionais entre as variáveis, não havendo significado físico para a relação encontrada, possuem aplicabilidade restrita aos dados que lhe deram origem, e por eventualidade, podem ajustar-se bem a condições semelhantes (TOMMASELLI; BACCHI, 2001).

O modelo polinomial cúbico é considerado universal, e determina a umidade em função da constante dielétrica (K_a). É usado em muitos equipamentos de TDR e não considera as características específicas de cada solo. Sendo assim, vários pesquisadores observaram que essa relação não possui aplicabilidade para todos os tipos de solos (SONCELA *et al.*, 2013).

De acordo com Topp *et al.*, (1980), a relação empírica existente entre a constante dielétrica K_a e o conteúdo volumétrico de água independe do tipo de solo, da sua densidade, da temperatura e da quantidade de sais solúveis. Esses autores

ajustaram uma equação polinomial de terceiro grau, tida como universal, que é embutida em muitos aparelhos comerciais, onde consideram que para frequências entre 20 MHz e 1 GHz, a única variável que afeta a resposta dielétrica do solo é o conteúdo de água do mesmo. Porém, essa curva de calibração genérica, fornecida por muitos fabricantes, pode não estimar de forma adequada a umidade volumétrica do solo (KAISER *et al.*, 2010; TOMMASELLI; BACCHI, 2001).

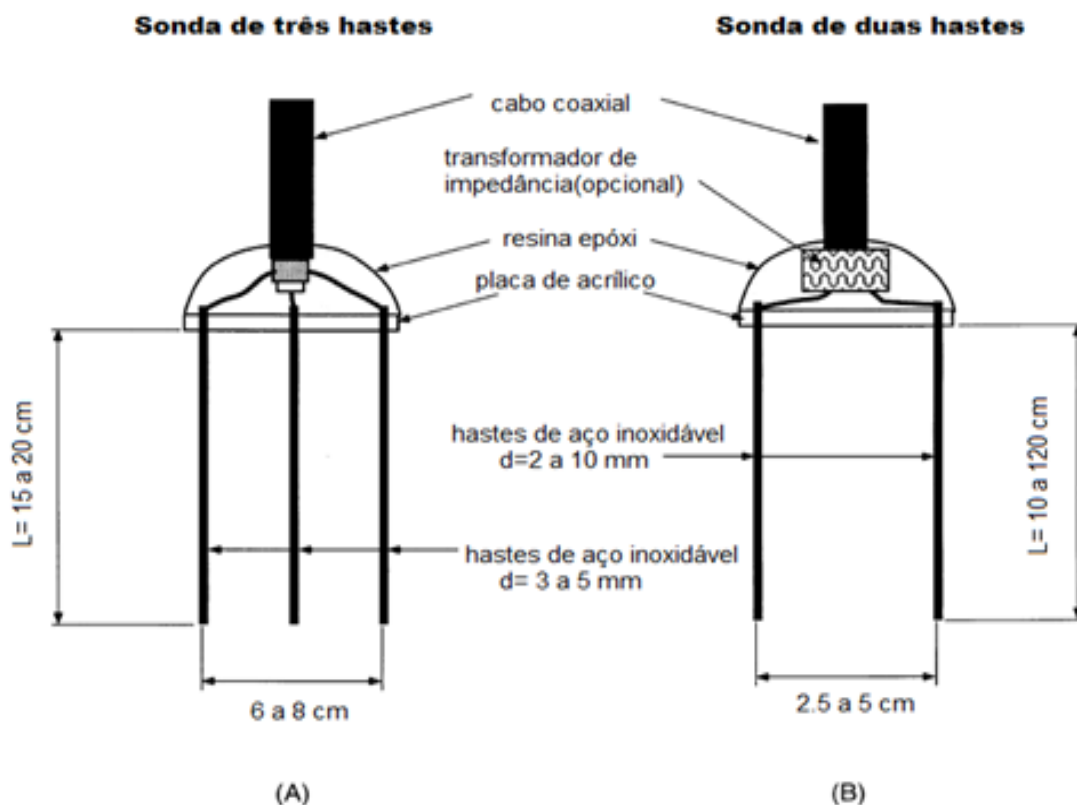
Para se obter uma curva de calibração representativa, a constante dielétrica (K_a) deve ser medida desde o solo com o mínimo de água até o máximo, solo saturado. Além disso, deve-se incluir no conjunto de dados, a constante dielétrica medida apenas em água, para fornecer uma condição de contorno para o ajuste da equação de calibração, e assim, prevenir erros na estimativa no campo, principalmente para a umidade próxima da saturação (GUBIANI *et al.*, 2015).

Tommaselli e Bacchi (2001), em seu trabalho, classificaram os modelos de calibração em modelos empíricos, semiempíricos e físicos, e ajustaram modelos polinomiais cúbicos calibrados para cinco tipos de solo brasileiros, (Areia Quartzosa, Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Terra Roxa Estruturada e Latossolo Vermelho-Escuro), na região de Piracicaba-SP, incluindo a densidade e a porosidade do solo nos modelos. Como resultados, obteve-se que o modelo universal e a curva embutida no equipamento não foram aplicáveis aos solos estudados, mostrando necessidade de calibração do aparelho para cada solo, especialmente para solos tropicais que apresentam grande variação na composição mineralógica.

Outra adversidade na utilização do equipamento são as sondas fornecidas pelo fabricante do dispositivo, que quando danificadas, apresentam custo elevado de substituição. Para resolver esse problema, várias sondas de baixo custo estão sendo construídas no Brasil (SONCELA *et al.*, 2013).

Entre os tipos de sondas mais usados, estão as sondas de duas e três hastes, como mostra a figura 1. A primeira geralmente apresenta tensões e correntes dispersas que podem aumentar incertezas na medição, necessitando assim, um transformador de impedância, já que foram poucos os pesquisadores que obtiveram resultados consistentes na medição da umidade quando não usaram o transformador. Já a sonda de três hastes é prática por fornecer formas de onda mais simples que permitem melhor definição do tempo de viagem do sinal ao longo do comprimento da haste, fato este que dispensa o uso de transformador de impedância (NOBORIO, 2001).

Figura 1- Tipos de sondas



Fonte: Noborio, 2001.

Batista *et al.*, (2016), desenvolveram guias de TDR, artesanalmente construídas, com três hastes de aço inoxidável de 0,15m, espaçadas 0,022m, obtendo através do experimento, resultados que demonstraram existir viabilidade no uso de sondas de TDR propostas como alternativa às sondas comerciais na estimativa de umidade do solo. O mesmo é observado por Souza *et al.*, (2006), onde o uso das sondas artesanais mostrou-se viável, uma vez que as sondas desenvolvidas possuem características físicas adequadas, viabilizando a utilização da técnica nas mais diversas condições, principalmente quando necessário grande quantidade de sondas de TDR.

Em um experimento realizado em laboratório por Milani *et al.*, (2008), onde tinha por objetivo verificar a viabilidade do emprego de sondas manufaturadas bem como sua calibração para um Latossolo Vermelho, após coleta de dados, de quinze sondas manufaturadas e duas sondas originais, em diferentes umidades, constatou-se a aplicabilidade das sondas artesanais, onde os coeficientes das equações de

calibração de todas as sonda mostraram-se semelhantes, indicando a possibilidade de emprego das sondas.

Sant`Ana *et al.*, (2012), avaliaram guias de onda de TDR construídas artesanalmente, de diferentes comprimentos de hastes, (0,30; 0,15; 0,12; 0,10; 0,08; 0,06; 0,04m), espaçadas 0,022m, onde puderam concluir que o comprimento de haste de sonda tem efeito na constante dielétrica e na estimativa da umidade volumétrica do solo, pois guias de onda de comprimento curto de haste apresentam melhor desempenho em solo com elevada umidade, porém, as empresas que trabalham com a construção dessas sondas de TDR, recomendam o uso de sondas com hastes acima de 0,10 m.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Laboratório de Pedologia e Física do Solo da Universidade Federal da Fronteira Sul, *Campus* Cerro Largo. Onde confeccionou-se as sondas artesanais, com os seguintes materiais: barras de aço inox, de 4mm de diâmetro, cabos coaxiais com 50 Ω de impedância, conectores do tipo BNC, resina poliéster Isoftálica, solda elétrica de aço inox, alicate decapador e moldes de silicone. As sondas artesanais foram construídas, com três hastes de aço inox, de 20 cm de comprimento, espaçadas 2,0 cm (Figuras 2 e 3).

Figura 2 - Sonda artesanal em processo inicial de construção, sonda artesanal em fase final de construção e sonda original, da esquerda para direita.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

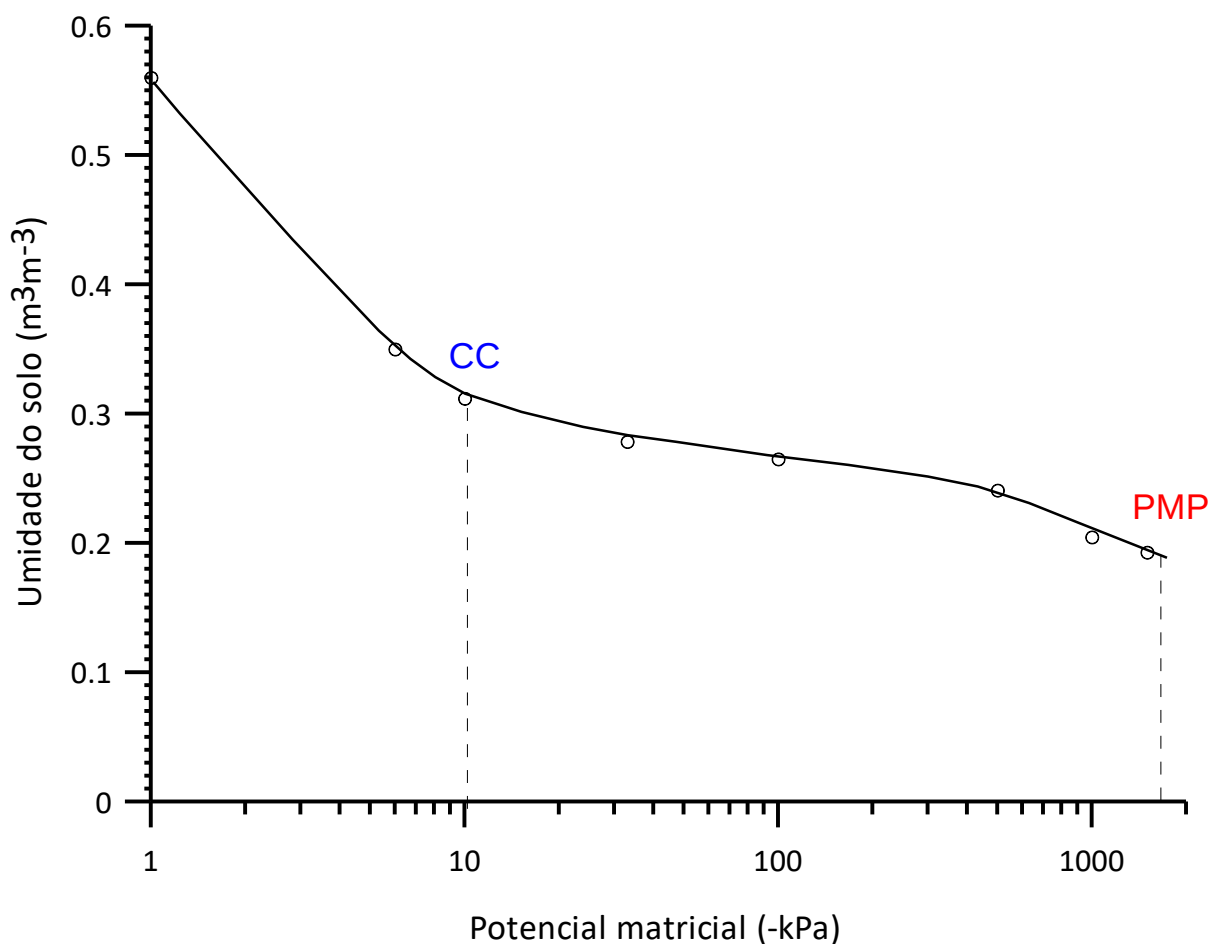
Figura 3 - Processo de fabricação da Sonda Artesanal, na qual a mesma se encontra no molde de silicone, com resina isoftálica aguardando secagem.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para avaliar a eficiência das sondas, determinou-se a constante dielétrica (K_a) de amostras de solo submetidas a diferentes condições de umidade (conteúdo de água). A avaliação das sondas foi realizada em solo saturado, solo com umidade na capacidade de campo (CC), solo com umidade no ponto de murcha permanente (PMP) e solo com umidade abaixo do PMP, conforme apresentado na curva de retenção de água para o solo estudado, (Figura 4). Para isso, coletou-se amostras do horizonte A (primeiros 20 cm) de um Latossolo Vermelho da área experimental da UFFS, Campus de Cerro Largo - RS. O solo apresenta 560 g kg^{-1} de argila, 30 g kg^{-1} de silte, 140 g kg^{-1} de areia e 25 g kg^{-1} de matéria orgânica. Esse solo pertence a Unidade de Mapeamento Santo Ângelo, que apresenta em média 246 g kg^{-1} de Fe_2O_3 no horizonte A.

Figura 4- Curva de retenção de água do solo utilizado para avaliar a eficiência das sondas artesanais. CC: conteúdo de água na capacidade de campo; PMP: conteúdo de água no ponto de murcha permanente.



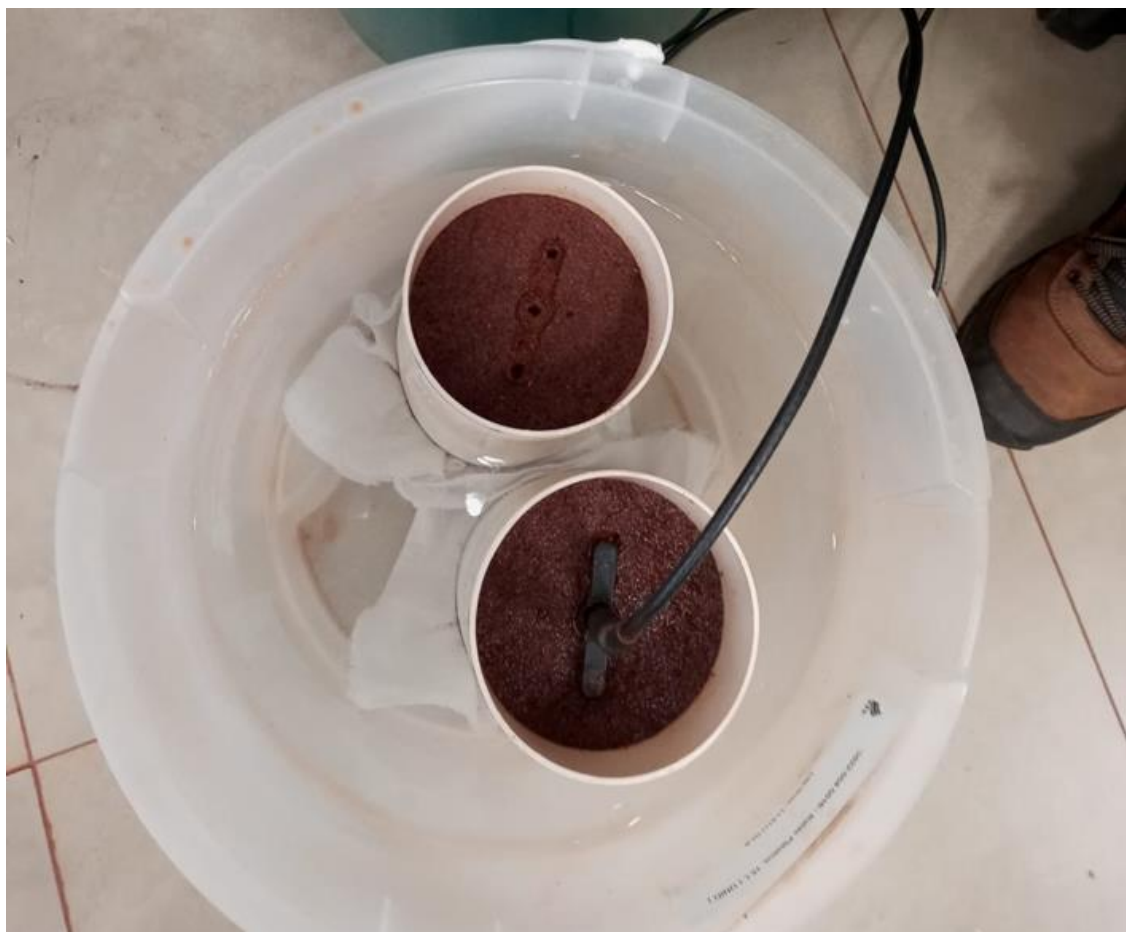
O solo foi coletado, seco ao ar e peneirado em peneira com malha de 4 mm. Após isso, parte do solo foi acondicionado em tubos de PVC com 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura (Figura 5). O solo foi compactado no tubo com um bastão de madeira, atingindo uma densidade média de 1 g cm^{-3} . Os tubos com o solo foram colocados em um balde e saturados com água (Figura 6). O processo de saturação ocorreu naturalmente pela ação da capilaridade. O solo saturado foi a primeira condição em que a umidade do solo foi avaliada através dos três métodos.

Figura 5 - Solo acondicionado em tubos de PVC, com dimensões de 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 6 - Solo saturado por ascensão capilar.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Parte dos tubos com solo após estarem saturados, foram submetidos a tensão de 10 kPa em mesa de tensão, por 48 horas, para atingirem a condição de umidade correspondente a capacidade de campo (Figura 7).

Figura 7 - Solo na mesa de tensão para determinação da condição de umidade na capacidade de campo.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para a condição de umidade do solo no PMP, adicionou-se ao solo seco ao ar, a quantidade de água necessária para atingir a condição de umidade no PMP. Após isso, o solo foi misturado e homogeneizado e acondicionado nos tubos de PVC (Figura 8). Para a condição de solo com umidade abaixo do PMP, utilizou-se o solo seco ao ar. A umidade do solo seco ao ar foi previamente determinada, pelo método gravimétrico, onde uma porção de solo úmido foi pesado e seco em estufa, para então determinar a umidade em base de massa.

Figura 8 - Acréscimo de água no solo (A- homogeneização do solo com acréscimo de água; B- montagem dos cilindros com o solo).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Após criada as diferentes condições de umidade do solo nos tubos de PVC, inseriu-se as sondas originais e artesanais nos tubos e mediu-se a constante dielétrica (K_a) do meio com a utilização de um aparelho de TDR, modelo 6050X3K5B MiniTrase. Esse aparelho converte automaticamente a constante dielétrica do meio em conteúdo volumétrico de água no solo, pela equação universal desenvolvida por Topp et al., (1980). Após as medições com o aparelho de TDR, o solo foi retirado dos tubos e pesado em balança de precisão. Em seguida, foi seco em estufa a temperatura de 105° C por 7 dias. Com a massa de solo úmido, a massa de solo seco e o volume do tubo de PVC, foi calculada a umidade em base de volume, para cada condição de umidade.

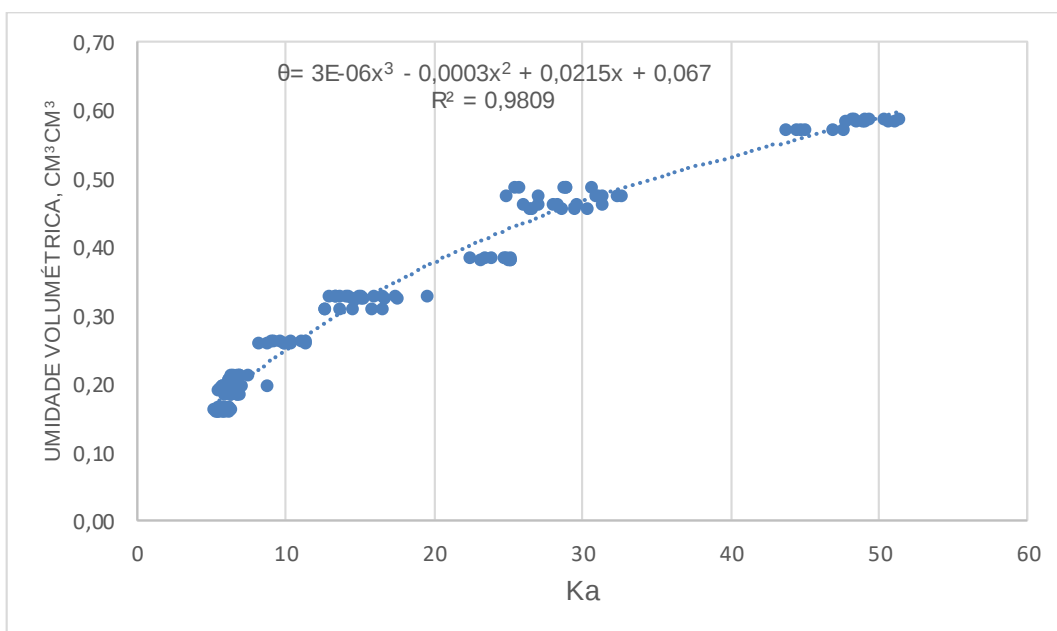
Para esse estudo, o delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos e nove repetições. Os tratamentos foram: 1- umidade volumétrica do solo medida com TDR com a sonda original (Sonda padrão); 2- umidade volumétrica do solo medida com TDR com sonda artesanal (Sonda artesanal) e 3- Umidade volumétrica real obtida pela pesagem do solo úmido e seco em estufa (UV real). Os dados obtidos foram inicialmente submetidos a análise da

variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. A análise estatística foi realizada com o *software* SASM AGRI.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados obtidos, gerou-se um novo modelo matemático entre a constante dielétrica do meio (K_a) e a umidade volumétrica do solo. Para isso, utilizou-se o conjunto de dados da umidade volumétrica real obtida com o solo acondicionado nos tubos e a constante dielétrica obtida com o aparelho de TDR utilizando-se as sondas originais e artesanais. Além disso, criou-se outras condições de umidade pela adição de água ao solo, com posterior acondicionamento nos tubos de PVC. Assim, obteve-se um maior conjunto de dados para contemplar toda faixa de umidade da curva de retenção de água desse solo (Figura 4). Os ajustes entre os dados foram feitos por regressão, utilizando-se o Excel (Figura 9).

Figura 9 - Modelo polinomial que teve o melhor ajuste ao conjunto de dados de umidade volumétrica real e constante dielétrica do meio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Para cada condição de umidade avaliada, foram testadas três modelos, equação de Topp *et al.*, (1980) (Equação 1), tida como universal, equação de Ledieu *et al.*, (1986) (Equação 2), e a nova equação polinomial obtida com dados deste trabalho (Figura 9). Essas equações foram utilizadas para estimar a umidade volumétrica do solo (U_v) a partir dos valores de constante dielétrica (K_a) obtidos com as sondas originais e com as sondas artesanais, para o conjunto de tubos sob as condições de umidade descritos anteriormente.

$$Uv=0.0000043Ka^3 -0.00055Ka^2 +0.029Ka -0.053 \quad (\text{Equação 1})$$

$$Uv= 0.1138\sqrt{Ka} -0.1758 \quad (\text{Equação 2})$$

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos a análise da variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância. A análise estatística foi realizada com o software SASM AGRI.

Para o solo em estudo, quando se utiliza a equação universal (Topp *et al.*, 1980), a sonda padrão original e a sonda artesanal obtém-se a mesma umidade ou conteúdo volumétrico de água no solo, (Tabela 1).

Tabela 1 - Desempenho dos métodos de avaliação da umidade do solo pelo equipamento de TDR, com o modelo de Topp embutido no próprio equipamento.

Condição de umidade	UV_Sonda padrão	UV- Sonda artesanal	UV Real	CV (%)
Solo saturado	0,54 b	0,55 b	0,58 a	2,23
Solo na CC*	0,27 b	0,29 b	0,33 a	8,25
Solo no PMP**	0,10 b	0,11 b	0,19 a	5,15
Solo seco ao ar	0,06 a	0,06 a	0,06 a	11,13

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

*CC: Capacidade de campo **PMP: Ponto de Murcha Permanente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

No entanto, a umidade real do solo foi superior do que a obtida com o TDR, com ambas as sondas. A equação de Topp subestimou a umidade volumétrica real, nas condições de solo saturado, condição de capacidade de campo e condição de ponto de murcha permanente, exceto na condição de solo seco ao ar, onde possivelmente devido ao baixo teor de umidade não teve diferença. Assim, percebemos que esse modelo matemático tido como “universal” não se adequa perfeitamente a esse tipo de solo em estudo.

Outros estudos também verificaram que a equação embutida no equipamento de TDR (Equação de Topp) subestimou os valores reais de umidade volumétrica (Silva e Gervásio, 1999), pois esse modelo cúbico tem os coeficientes fixos, não levando em consideração as propriedades físicas e os componentes dielétricos do solo, o que justifica o baixo desempenho (COELHO *et al.*, 2006).

A técnica de TDR vem sendo amplamente utilizada para determinar indiretamente o conteúdo de água no solo, sendo importante para o manejo da irrigação e em estudos da dinâmica da água no solo. Assim, essa técnica pode ser utilizada, pois apresenta resultados satisfatórios, mas o equipamento necessita de calibração de modo a se obter um valor preciso da umidade volumétrica, respeitando assim as particularidades de cada solo, principalmente nos latossolos, devido aos altos teores de ferro e argila, onde a calibração que vem embutida no equipamento pelo fabricante não observa essas particularidades, limitando sua aplicabilidade (VILLWOCK; TAVARES; VILAS BOAS, 2004).

Quando foi usado a equação de Ledieu, constatou-se que em todas as condições de umidade, as medidas obtidas com as sondas padrão não diferiram das obtidas com as sondas artesanais, pelo teste de Tukey, a 5% de significância, evidenciando a eficiência das sondas artesanais. Porém, quando as medidas foram comparadas com a umidade volumétrica real, houve diferença significativa, superestimando a umidade na condição de solo saturado e subestimando nas condições de capacidade de campo e na condição de ponto de murcha permanente, na condição de solo seco ao ar, não houve diferença, (Tabela 2).

Tabela 2 - Desempenho dos métodos de avaliação da umidade do solo pelo equipamento de TDR, com o modelo de Ledieu.

Condição de umidade	UV_Sonda padrão	UV- Sonda artesanal	UV Real	CV (%)
Solo saturado	0,60 a	0,62 a	0,58 b	2,53
Solo na CC*	0,26 b	0,28 b	0,33 a	8,38
Solo no PMP**	0,10 b	0,11 b	0,19 a	5,22
Solo seco ao ar	0,06 a	0,06 a	0,06 a	12,10

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

*CC: Capacidade de campo **PMP: Ponto de Murcha Permanente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Portanto, o modelo de Ledieu *et al.*, (1986), considerado um dos modelos “universais” não é o mais adequado para estimar a umidade volumétrica para esse tipo de solo, (Latosolo Vermelho), pois sua calibração deriva de solos formados em condições de clima temperado diferentes das condições do clima tropical e subtropical

do Brasil, onde há predominância de solos altamente intemperizados, (MELO; KAISER; LEMES, 2018).

Em estudo realizado com quatro tipos de solo, o modelo de Ledieu não se adaptou, apresentando variabilidade em locais onde existem diferenças na condutividade elétrica, teor de argila e quartzo, e na matéria orgânica do solo, mostrando, que um modelo empírico pode comprometer a precisão das determinações de umidade do solo, quando aplicadas a cada solo individualmente, sendo que as equações consideradas universais usadas nos dispositivos de TDR não devem ser generalizadas para todas classes de solo, principalmente as tropicais, onde há grande variação na composição mineralógica. Modelos específicos devem ser originados a partir de curvas de calibração para cada tipo de solo (KAISER *et al.*, 2010).

A nova equação polinomial, gerada a partir dos dados desse trabalho, apresentou maior eficiência pois quando as medidas foram comparadas com a umidade volumétrica real, (Tabela 3), não diferiram entre si à 5% de significância pelo teste de Tukey, com exceção da condição de solo saturado. Fato esse pode ser justificado devido à falta de uma condição de contorno onde a constante dielétrica é medida apenas em água para prevenir erros de estimativa, principalmente para umidade próxima da saturação, (GUBIANI *et al.*, 2015).

Tabela 3 - Desempenho dos métodos de avaliação da umidade do solo pelo equipamento de TDR, pelo modelo proposto na figura 9.

Condição de umidade	UV_Sonda padrão	UV- Sonda artesanal	UV Real	CV (%)
Solo saturado	0,73 a	0,75 a	0,58 b	3,65
Solo na CC*	0,33 a	0,35 a	0,33 a	7,01
Solo no PMP**	0,19 a	0,19 a	0,19 a	2,70
Solo seco ao ar	0,06 a	0,06 a	0,06 a	4,81

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

*CC: Capacidade de campo **PMP: Ponto de Murcha Permanente.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

5 CONCLUSÕES

As sondas artesanais confeccionadas a partir de materiais nacionais se mostraram eficientes, sendo uma alternativa viável para obtenção do conteúdo de água do solo.

As equações de Topp *et al.*, (1980) e de Ledieu *et al.*, (1986) conhecidas como “universais” e que estão embutidas nos dispositivos de TDR não são adequadas para estimar a umidade volumétrica do Latossolo estudado.

O modelo de calibração gerado para o solo em estudo foi o polinomial $\theta = 3E-06x^3 - 0,0003x^2 + 0,0215x + 0,067$, com coeficiente de determinação $R^2=0,98$ e apresentou maior eficiência na estimativa da umidade do solo.

REFERÊNCIAS

ANA- Agência Nacional de Águas. **Atlas Irrigação**. 2020. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br/>. Acesso em: 23 de março de 2020.

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

BATISTA, L, dos, S *et al.* Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Bras. Agric. Irr**, Fortaleza, v. 10, n.2, p.522-532, març/abr, 2016.

BEUTLER, A. N. *et al.* Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p.829-834, 2002.

CALBO, A. G. Estado da água no solo e na planta. *In*: CALBO, A. G.; SILVA, W. L. C. Sistema Irriga para manejo de irrigação: fundamentos, aplicações e desenvolvimentos. Brasília: Embrapa Hortaliças, p.95-102, 2005.

CARLESSO, R.; SANTOS, R.F. Disponibilidade de água às plantas de milho em solos de diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 17-25, 1999.

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

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

COELHO, Eugênio Ferreira *et al.* Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n.1, p. 23-30, 2006.

COLLARES, G. L. *et al.* Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.3, p.933-942, Viçosa, MG, 2008.

FALLEIROS, Marcos de Castro. **Medida da umidade do solo com sonda de nêutrons**. Orientador: Klaus Reichardt.1994. Tese (Doutorado em Ciências)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

FERREIRA, M. M. Caracterização Física do Solo. *In*: LIER, Q. J. van. **Física do Solo**. Viçosa, MG: SBCS, p.1-27, 2010.

GOMIDE, R. L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. *In*: **Manejo de Irrigação**. Lavras: Suprema, 1998, cap. 2, p.133-280.

GUBIANI, P. I., *et al.* Condição de contorno para calibração de reflectômetro usado para medição de água no solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v.45, n.8, p.1412-1417, ago. 2015.

KAISER, D. R. *et al.* Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 649-658, 2010.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção de água no solo. **REGET**, UFSM, Santa Maria, v. 19, n.1, p.21-29, jan-abr 2015.

KLEIN, V. A. **Física do solo**- 2. ed. – Passo Fundo, RS: Universidade de Passo Fundo, 2012. 240 p.

KLEIN, V. A., REICHERT, J. M., REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho Argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Eng. Agríc. Amb**, Campina Grande, PB, v.10, n.03, p.646-650, 2006.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2011. 456 p.

MEDEIROS, J.D. F. *et al.* Calibração de sondas do TDR em um Latossolo. **RBRH**, v.12, n.2, p. 19-25, abr/jun 2007.

MELO, A. G.; KAISER, D. R.; LEMES, F. de L. Calibração de Dispositivo TDR (*Time Domain Reflectometry*) Para Estimativa De Umidade Volumétrica Em Latossolo. **XVII Reunião Sul Brasileira de Ciência do Solo**, Xanxerê, 2018.

MILANI, D. I. C.; TAVARES, M. H. F.; SCHERPENSKI, C. Calibração de sondas TDR em condições de laboratório. **Ambi-Agua**, Taubaté, v.3, n.1, p.68-75, 2008.

NETO, Mário Diniz de Araújo. Métodos de medição da água no solo: uma breve discussão. **Revista Geonomos**, v.2, p. 51-61, 1994.

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

PEREIRA, S *et al.* Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. **Revista Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, PB, v.10, n.2, p.306-314, 2006.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera** – 2. ed. – Barueri, SP: Manole, 2012. 500p.

REICHERT, J.M. *et al.* Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, MG, v.33, n.6, p.1547-1560, nov./dez. 2009.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B. de.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes** – 5. ed.- Lavras, MG: UFLA, 2007. 322 p.

ROBINSON, D. A.; BELL, J.P.; BATCHELOR, C. H. Influence of iron and titanium on water content determination by TDR. *In: Time Domain Reflectometry Applications*

in **Soil Science Held at the Research Centre Foulum**, Denmark, 1994, p. 63-70.
Disponível em: <https://pe2bz.philpem.me.uk/Comm01/-%20TestEquip/-%20TDR/Info-907-Theory/SoilMoist-04/titan.html>. Acesso em: 15 de mai. 2020.

Sant'Ana, J. A. do. V., *et al.* Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n.4, p.1123-1129, 2012.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 5 ed. rev. ampl.- Brasília, DF: Embrapa Solos, 356p, 2018.

SILVA, E. L. da., GERVÁSIO, E. S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo Distrófico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande- PB v.3, n.3, p.417-420, 1999.

SONCELA, R *et al.* Construction and calibration of tdr probes for volumetric water content estimation in a distroferic Red Latosol. **Revista Eng. Agríc**, Jaboticabal-SP, v.34, n.5, p.919-928, set./out. 2013.

SOUZA, C. F. *et al.* Sondas de TDR para a estimativa da umidade e da condutividade elétrica do solo. **Revista Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p.12-25, jan./mar.2006.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Avaliação de sondas multi-haste segmentadas para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 63-68, 2002.

SUZUKI, L. E. A. S *et al.* Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.38, n.1, p.94-106, 2014.

STREECK, E. V. *et al.* **Solos do Rio Grande do Sul**- 3.ed- Porto Alegre,RS: Emater RS- Ascar, 2018. 252p.

TEIXEIRA, C. F. A.; MORAES, S. O.; SIMONETE, M. A. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, n.2, p.161-168, 2005.

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

TOOP, 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, jun 1980.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F.; VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 82-88, jan./abr. 2004.