



**PATRINI BARRETO FEITOSA**

**O EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SOLUTOS NA  
RELAÇÃO UMIDADE DO SOLO–RESISTIVIDADE  
ELÉTRICA EM SOLOS TROPICAIS**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**PATRINI BARRETO FEITOSA**

**O EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SOLUTOS NA RELAÇÃO UMIDADE  
DO SOLO–RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM SOLOS TROPICAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Orientador

**Lavras – MG**

**2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Feitosa, Patrini Barreto.

O efeito da concentração de solutos na relação umidade do solo–resistividade elétrica em solos tropicais / Patrini Barreto Feitosa. - 2022.

66 p. : il.

Orientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. sensores proximais. 2. água no solo. 3. salinidade no solo. I. Silva, Bruno Montoani. II. Título.

**PATRINI BARRETO FEITOSA**

**O EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE SOLUTOS NA RELAÇÃO UMIDADE  
DO SOLO–RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM SOLOS TROPICAIS**

**THE EFFECT OF SOLUTES CONCENTRATION ON SOIL  
MOISTURE-ELECTRICAL RESISTIVITY RELATIONSHIP ON TROPICAL  
SOILS.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 24 de fevereiro de 2022.

Dra. Michele Duarte de Menezes      UFLA

Dr. José Maria de Lima                      UFRB

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Orientador

**Lavras – MG**

**2022**

*A todos que trabalham com a produção agrícola.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e ao universo, por ter tornado possível entrar no mestrado na UFLA, por ter colocado pessoas maravilhosas no meu caminho e por ter conhecido excelentes pesquisadores. Agradeço por estar concluindo esse momento da minha vida e por ter aprendido bastante.

Agradeço aos pesquisadores que trabalham com água no solo e que tornaram a pesquisa possível, agradeço à UFLA, ao programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo e às instituições de fomento CNPq, CAPES, Fapemig. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Agradeço ao meu orientador Bruno Montoani porque me acolheu quando eu cheguei em Lavras, me orientou muito bem durante o mestrado, ajudou no meu desenvolvimento como pesquisadora, agradeço pelas caronas e conversas.

Agradeço ao professor Raul Shiso que me ajudou na caminhada da graduação e me incentivou a entrar no mestrado na UFLA. Agradeço ao professor Claudivan Feitosa por ter sido um professor inspirador durante a minha graduação e por ter me ajudado com perguntas do meu mestrado.

Agradeço à Tainá por me ajudar com as atividades de laboratório. Agradeço ao Doroteo e ao Pezão porque me ajudaram muitíssimo durante todo o mestrado. Muita gratidão a vocês!

Agradeço aos amigos Monna Lysa, Fernandes Antônio, Lázaro, Pedro Namorato, Brenda e Marcos que eu encontrei e que me acolheram em Lavras, me ajudaram a desenvolver o meu projeto dentre outras muitas coisas. Agradeço às minhas amigas da república Alana Cristina, Luiza Frossard e Ana Carolina pela convivência, por tornarem todo o processo mais fácil, pelos conselhos.

Quero agradecer a minha família, em especial a minha mãe Maria da Conceição, meu pai José Feitosa, minhas irmãs Patrícia e Patriane que são parte fundamental do processo de desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço aos amigos Paulo Gonçalves e Lucas Yida por sempre estarem presentes. Agradeço a todos os muitos outros nomes que não foram citados, mas que estão guardados no coração e na memória.

Todos vocês ajudaram no meu desenvolvimento pessoal e profissional, gratidão a todos!

*“Somente com o solo recuperado combate-se a miséria.  
E somente com a miséria vencida controla-se o meio  
ambiente e se salva a vida em nosso planeta.”*

**Ana Primavesi**

## RESUMO GERAL

Diferentes práticas agrícolas como correção de acidez no solo, adubação e fertirrigação, ou mesmo a contaminação do solo com sais e metais alteram a concentração de solutos no solo. A Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE) tem sido utilizada para determinar a resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ) e com esta estimar o conteúdo de água no solo ( $\theta$ ). Além do  $\theta$ , a  $\rho$  é influenciada por variações na concentração de solutos, temperatura, textura, carbono orgânico, porosidade, pH e densidade do solo. A estimativa do  $\theta$  por meio da  $\rho$  tem sido demonstrada em diversos estudos, no entanto, a relação  $\theta$ - $\rho$  ainda não foi estudada para solos tropicais com diferentes concentrações de solutos, o que pode comprometer a estimativa de  $\theta$  por meio da  $\rho$ . A hipótese desse trabalho é que com o aumento da concentração de solutos no solo, essa passa a ter maior influência na  $\rho$  do que o  $\theta$ , dificultando, assim, o monitoramento do  $\theta$ , acarretando a superestimativa de  $\theta$ . Assim, os objetivos desse estudo foram: (1) avaliar a influência da concentração de solutos na solução do solo nas relações relação  $\theta$ - $\rho$ ; (2) identificar qual ferramenta estima  $\theta$  com maior acurácia; e (3) identificar as variáveis com maior sensibilidade à  $\rho$ . Amostras com estrutura preservada de três solos - Typic Dystrustept, Rhodic Hapludult e Rhodic Hapludox - foram submetidas a 5 tratamentos diferentes, sendo 1 tratamento controle e 4 tratamentos com aumento de sua condutividade elétrica ( $\sigma$ ) para 10, 15, 25 e 50  $\text{dSm}^{-1}$ , em 4 repetições. Inicialmente, as amostras foram saturadas com as soluções de 55, 110, 275 e 550g de  $\text{NaCl L}^{-1}$ . Na sequência, foram realizadas leituras de temperatura,  $\sigma$  e  $\theta$  com sensor de capacitância,  $\rho$  com resistivímetro por meio de arranjo de 4 eletrodos e  $\theta$  pelo método padrão. Os dados de  $\theta$ ,  $\rho$  e  $\sigma$  foram ajustados a modelos matemáticos, sendo esses potencial, logarítmico, polinomial, exponencial e linear, e foram avaliados de acordo com o  $R^2$ , a raiz do erro médio quadrático (RMSE) e AIC (Critério de Informação de Akaike). O modelo potencial foi o que melhor descreveu as relações entre  $\theta$ - $\rho$  para solos com concentrações de solutos até 25  $\text{dSm}^{-1}$ . Acima desse valor, os modelos polinomial e logarítmico apresentaram maior acurácia. A  $\rho$  distinguiu melhor os tratamentos na condição de solo saturado do que a  $\sigma$ , sendo que variáveis relacionadas com a concentração de solutos foram as mais sensíveis à  $\rho$ . Ainda, a concentração de solutos influenciou mais a  $\rho$  do que  $\theta$ . Portanto, com o aumento da concentração de solutos, essa passa a influenciar mais a  $\rho$  do que o  $\theta$ . Em adição, a  $\rho$  é capaz de estimar  $\theta$  com acurácia em solos com diferentes concentrações de solutos e foi capaz de diferenciar as concentrações de solutos no solo melhor do que a  $\sigma$ , quando  $\theta$  estava acima de  $0,4\text{m}^3\text{m}^{-3}$ .

**Palavras-chave:** sensores proximais; água no solo; salinidade no solo.



## GENERAL ABSTRACT

Different agricultural practices such as soil acidity correction, fertilization and fertirrigation or soil contamination with salts and metals alter the concentration of solutes in the soil. Electrical Resistivity Tomography (ERT) has been used to determine the soil electrical resistivity ( $\rho$ ) and with it estimate the soil water content ( $\theta$ ). In addition to  $\theta$ ,  $\rho$  is influenced by variations in solute concentration, temperature, soil texture, soil organic carbon, soil porosity, pH and soil bulk density. The estimation of  $\theta$  through  $\rho$  has been demonstrated in several studies, however, the relationship between  $\theta$ - $\rho$  has not been studied for soils with different solute concentrations yet, which may compromise the estimation of  $\theta$  through  $\rho$ . The hypothesis of this work is that with the increase of soil solute concentration, the solute concentration starts to have more influence on  $\rho$  than  $\theta$ , making more difficult to monitor  $\theta$ , causing its overestimation. Thereby, the objectives of this study were: (1) evaluate the influence of solute concentration in the soil solution under the  $\theta$ - $\rho$  relationship; (2) identify which tool estimates  $\theta$  more accurately; and (3) identify the variables with greater sensibility to  $\rho$ . Samples with preserved structure of three soils - Typic Dystrustept, Rhodic Hapludult and Rhodic Hapludox – were submitted to 5 treatments, 1 was the control treatment and 4 treatments were with increase of electrical conductivity ( $\sigma$ ) to 10, 15, 25 and 50  $\text{dSm}^{-1}$ , in 4 repetitions. Initially, the samples were saturated with solutions of 55, 110, 275 and 550g of  $\text{NaCl L}^{-1}$ . Subsequently were taken readings of temperature,  $\sigma$  and  $\theta$  with a capacitance sensor,  $\rho$  with a resistimeter using an arrangement of 4 electrodes, and  $\theta$  through the standard method. The data of  $\theta$ ,  $\rho$  and  $\sigma$  were adjusted to mathematical models, like potential, logarithmic, polynomial, exponential and linear, and then evaluated according to  $R^2$ , root mean square error (RMSE) and AIC (Akaike Information Criterion). The potential model was the one that best described the  $\theta$ - $\rho$  relationship for soils with solute concentrations until 25  $\text{dSm}^{-1}$ . Above this value, the polynomial and logarithmic started to have better performance. The  $\rho$  was able to better separate treatments in saturated soil condition than  $\sigma$ , and variables related to solute concentration were the most sensitive to  $\rho$ . Still, the concentration of solutes influenced  $\rho$  more than  $\theta$ . Therefore,  $\rho$  is able to estimate  $\theta$  more accurately in soils with different solute concentrations and was able to differentiate soil solute concentrations better than  $\sigma$ , when  $\theta$  was above  $0.4\text{m}^3\text{m}^{-3}$ .

**Keywords:** proximal sensors; soil water content; soil salinity.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>11</b>
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>13</b>
2.1 Conceito de resistividade elétrica do solo.....	13
2.2 Determinação da resistividade elétrica do solo.....	14
2.3 Fatores que influenciam na resistividade elétrica do solo.....	15
2.4 Concentração de solutos no solo.....	18
2.5 Medição do conteúdo de água do solo a partir da resistividade elétrica.....	20
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>
<b>ARTIGO 1.....</b>	<b>27</b>
1. INTRODUÇÃO.....	28
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	29
2.1 Descrição da área experimental.....	29
2.2 Amostragem do solo e preparação das amostras.....	31
2.3 Descrição da calibração em laboratório.....	31
2.4 Análises estatísticas.....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
3.1 Modelagem da relação entre $\theta$ - $\rho$ em três solos diferentes.....	32
3.2 Efeito da concentração de solutos na relação $\theta$ - $\sigma$ .....	39
3.3 Relação entre $\theta$ , $\rho$ , $\sigma$ e atributos físicos e químicos do solo.....	44
4. CONCLUSÃO.....	48
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>48</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>54</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>59</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1. Introdução Geral

A resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ) mede a dificuldade da passagem da corrente elétrica no solo (Nascimento et al., 2008) e é influenciada por diversos fatores, como o conteúdo de água ( $\theta$ ), pH, densidade do solo, textura, carbono orgânico (Hadzik et al., 2011), composição química do solo (Rhoades et al., 1989; Rinaldi & Cuestas, 2002), concentração de solutos, temperatura (Jayawickreme et al., 2010) e estrutura do solo (Fukue et al., 1999). A resistividade elétrica é o oposto da condutividade elétrica do solo ( $\sigma$ ); quanto maior é a  $\sigma$  do solo, menor será a  $\rho$ .

A relação entre  $\rho$  e  $\theta$  é inversa, assim como a relação entre  $\rho$  e a concentração de solutos, sendo que quanto maior é  $\theta$  ou quanto maior é a concentração de solutos no solo, menor é a  $\rho$  (Samouëlian et al. 2005). Assim, se um solo apresentar baixo conteúdo de água, mas apresentar alta concentração de solutos, a sua  $\rho$  será baixa devido à concentração de íons nesse solo.

Para a medição da  $\rho$  utiliza-se o método da Tomografia de Resistividade Elétrica (TRE). Esse método é vantajoso por não ser um método destrutivo, além de ser muito sensível as variações do solo e não exigir a abertura de trincheiras no solo para a obtenção de dados. No entanto, apresenta limitações como a necessidade de calibração, necessidade de inversão dos dados e possibilidade de acontecer um pobre contato entre o eletrodo e o solo, que pode comprometer os resultados (Samouëlian et al., 2005; Loke et al., 2013).

Um das principais aplicações da medição de propriedades eletromagnéticas do solo, como a  $\rho$ , é a estimativa do  $\theta$ . Diferindo do método padrão (termogravimétrico) e de outros métodos mais comumente utilizados, como a reflectometria no domínio do tempo e da frequência (TDR e FDR), os métodos geofísicos permitem medições com diferentes resoluções, em profundidades superiores a 10 metros (Samouëlian et al. 2005; Calamita et al., 2012; Dick et al., 2018) com equipamentos nacionais de relativo baixo custo de aquisição e manutenção (Melo et al., 2021). A TRE é um método geofísico que tem como resultados a confecção de mapas 1D, 2D ou 3D, que permitem estudos de variabilidade espacial e temporal da  $\rho$  em campo a partir da medição da corrente elétrica e potencial elétrico do solo por meio de arranjos. Esses arranjos diferem em algumas características, como sensibilidade

vertical e horizontal de avaliação, intensidade do sinal e profundidade de avaliação. Alguns desses arranjos são o Wenner, Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger (Samouëlian et al. 2005; Loke et al., 2013).

Em solos tropicais, a TRE ainda é pouco utilizada para estimar o  $\theta$  do solo, com poucos estudos relacionando a  $\rho$  e o  $\theta$  do solo. Melo et al. (2021) verificaram que para um mesmo  $\theta$ , o Latossolo apresentou menores valores de  $\rho$  em comparação com outros estudos realizados em solos de clima temperado. Contudo, é necessária a realização de novos estudos verificando essa relação para outros solos tropicais com diferentes graus de intemperismo.

Outro fator que interfere na  $\rho$  ainda pouco estudado em solos em condições de clima tropical é a concentração de solutos. Estudos tem mostrado acentuada redução da  $\rho$  em função do aumento da concentração de sais no solo (Iezzi et al., 2008; Nascimento et al., 2008). Esse efeito é importante porque pode influenciar a relação entre  $\theta$ - $\rho$ , atuando como fonte de erro ao usar o método da TRE para quantificar o  $\theta$  (Samouëlian et al. 2005; Hadzik et 2011; Dick et al., 2018), como observado em trabalhos com outros sensores TDR e FDR em solos tropicais (Evelt et al., 2006; Silva et al., 2012). Por outro lado, o incremento na concentração de solutos no solo pode ser resultado de diferentes práticas agrícolas como correção de acidez no solo, adubação e fertirrigação, mas também como consequência da contaminação do solo com sais e metais, ou ainda, áreas em condição natural com teores elevados de sais, como Planossolos Nátricos. O intemperismo do solo é um fator para o aumento da  $\rho$ , visto que a remoção de sais solúveis é processo de diferenciação de classes de solos.

No Brasil, as áreas com solos salinos se concentram principalmente nas regiões semiáridas do Nordeste, onde a taxa de evapotranspiração é maior que o índice pluviométrico, portanto, há aumento de concentração ou menor remoção de sais desses solos. Nas áreas irrigadas, como no estado de Pernambuco, há elevada salinidade ou teores de Na trocável (Barros et al., 2004). Outras áreas que também apresentam altos índices de salinidade estão no Pantanal e no Rio Grande do Sul. Todos esses solos apresentam maior condutividade e menor resistividade à passagem de corrente elétrica.

Assim, a TRE pode contribuir como ferramenta útil para estimar o  $\theta$  e a concentração de solutos em solos tropicais e ser utilizada em agricultura de precisão indicando a fertilidade do solo. É, ainda, uma ferramenta útil para análise de áreas contaminadas (Jayawickreme et al., 2011; Aranda et al., 2021). Assim, a  $\rho$  pode ser uma das ferramentas utilizadas como indicadora da qualidade ou da saúde do solo.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1 Conceito de resistividade elétrica do solo

A resistividade elétrica é uma propriedade física de todo material e mede a resistência da passagem da corrente elétrica por esse material. O solo e as rochas apresentam alta  $\rho$ , no entanto, como a  $\rho$  é influenciada principalmente pelo  $\theta$ , quando o solo se apresenta úmido a sua  $\rho$  é fortemente reduzida (Hayley et al., 2007; Nascimento et al., 2008; Jayawickreme et al., 2010).

Enquanto os métodos que empregam passagem de corrente elétrica são métodos indiretos para estimar o conteúdo de água no solo, o método termogravimétrico é o método padrão e de maior acurácia para determinar o  $\theta$ . Todavia, por ser um método demorado, que requer a amostragem do solo, e apresentar resolução temporal e espacial limitada, novos métodos devem ser considerados para a determinação do conteúdo de água no solo (Dobriyal et al., 2012). Esse método apresenta resolução espacial limitada por fornecer informações do  $\theta$  no solo apenas nos pontos de coleta e a sua resolução temporal é limitada devido ao tempo necessário para coleta em campo e processamento dos dados em laboratório, o que limita a análise do  $\theta$  em menor espaço de tempo.

Assim, a TRE tem sido um método utilizado por apresentar vantagens em relação método padrão, embora precise deste para a calibração. Além da TRE ser um método não invasivo, ter a resolução espacial dos mapas gerados ajustável, e a possibilidade de ser implementada em terrenos de difícil acesso, o custo-benefício da operação é mais vantajoso, por ser um método rápido e comprovadamente sensível. Ainda, apresenta alta resolução temporal e espacial, isto é, depois da montagem do equipamento em campo, diversas leituras podem ser realizadas em um espaço de tempo menor do que o método termogravimétrico; os mapas gerados trazem resultados de  $\rho$  que podem ser relacionados com os de  $\theta$  do solo, assim, não teremos pontos de análise como no método padrão, mas sim um mapa mostrando a distribuição do  $\theta$  do solo (Samouëlian et al., 2005; Jayawickreme et al., 2008; Jayawickreme et al., 2010; Hadzik et al., 2011; Noretto et al., 2013).

No entanto, esse método também apresenta limitações como necessidade de calibração, que deve ser realizada em laboratório devido ao maior controle operacional. Além disso, o método da TRE traz resultados de resistividade elétrica da pseudo-profundidade do solo, isto é, a  $\rho$  não é medida na profundidade de análise do solo, mas é obtida de forma

indireta por meio da inversão dos dados. A inversão dos dados pode ser realizada por meio de diferentes modelos matemáticos, o que pode gerar ambiguidades ou interpretação errônea dos resultados. O contato solo-eletrodo também pode ser fonte de erro, problema que pode ser mitigado empregando-se maior número de repetições de leitura (Samouëlian et al., 2005).

O método da TRE além de ser utilizado em trabalhos para determinar o  $\theta$ , tem sido utilizado para estudar a distribuição de raízes no solo e delinear zonas de manejo na agricultura de precisão (Corwin & Lesch, 2003; Samouëlian et al., 2005; Amato et al., 2008; Jayawickreme et al., 2008; Jayawickreme et al., 2010; Calamita et al., 2012; Paglis, 2013). Além disso, tem sido utilizado em trabalhos sobre reservatório de água no solo (aquíferos), estudos de temperatura do solo e em estudos de uso e manejo e de compactação do solo (Jayawickreme et al., 2008; Jayawickreme et al., 2011; Musgrave et al., 2011; Nosetto et al., 2013; Jeřábek et al., 2017; Melo et al., 2021).

## **2.2 Determinação da resistividade elétrica do solo**

O método da TRE determina a distribuição da  $\rho$  utilizando quatro eletrodos, sendo esses os eletrodos A B M e N. Os eletrodos A e B são injetores de corrente elétrica, enquanto os eletrodos M e N são eletrodos de potencial elétrico, sendo utilizados para calcular a diferença de potencial do solo (Jayawickreme et al., 2008; Nascimento et al., 2008). O solo possui um potencial elétrico natural, denominado potencial espontâneo, que deve ser subtraído da medição feita com os eletrodos M e N (Orellana, 1972; Telford et al., 1985).

Em experimento de campo, varia-se a localização e o espaçamento entre os eletrodos ao longo de um transecto, gerando mapas 2D ou 3D (Musgrave et al., 2011). Com a variação do espaçamento entre os eletrodos, altera-se a profundidade do solo a ser avaliada (Orellana, 1972; Telford et al., 1985). Como a resistividade elétrica está sendo medida em um meio heterogêneo e em função do arranjo dos eletrodos, essa resistividade elétrica é tratada como aparente (Nascimento et al., 2008). Por obter a  $\rho$  aparente, depois de obtidos os dados de resistividade, é necessário fazer uma inversão dos dados para se obter a  $\rho$  na profundidade efetiva de análise (Samouëlian et al., 2005).

Diferentes arranjos podem ser aplicados para medir a  $\rho$ . Esses arranjos mudam de acordo com a posição dos eletrodos de corrente e de potencial. Os arranjos mais usados são: Wenner, Wenner-Schlumberger, dipolo-dipolo, polo-polo ou polo-dipolo (Samouëlian et al.,

2005). Os arranjos mudam a resolução, a sensibilidade e a profundidade de análise do solo (Seaton & Burbey, 2002).

O arranjo 1D, como o Wenner, geralmente é utilizado em experimentos de laboratório para calibração da resistividade elétrica, a exemplo do ajuste de modelos empíricos entre dados de  $\rho$  e  $\theta$  obtido pelo método padrão da estufa. Em arranjos 2D, é mantida uma distância fixa entre os eletrodos M e N e entre os eletrodos A e B. Assim, quanto maior a distância entre os eletrodos de corrente e de potencial, maior será a profundidade do solo avaliada (Samouëlian et al., 2005).

### 2.3 Fatores que influenciam na resistividade elétrica do solo

A TRE é um método não invasivo, que pode ser utilizado para prospectar alterações em propriedades do solo, tais como o  $\theta$ , pH, densidade do solo, textura, carbono orgânico (Hadzik et al., 2011), composição química do solo (Rhoades et al., 1989; Rinaldi & Cuestas, 2002), concentração de solutos, temperatura (Jayawickreme et al., 2010) e estrutura do solo (Fukue et al., 1999). Por ser afetada por diversos fatores, é difícil determinar qual fator será o de maior influência (Jeřábek et al., 2017), fazendo com que a medida da  $\rho$  seja ambígua, a não ser que apenas um fator tenha predominância na variação da  $\rho$  (Musgrave et al., 2011).

O principal fator que influi no valor mensurado da  $\rho$  é o  $\theta$  e a concentração de solutos na solução do solo (Calamita et al., 2012). Assim, o método da TRE permite aprimorar o conhecimento quanto à relação solo-água (Jayawickreme, 2010), quanto ao seu movimento vertical e de infiltração no solo, sendo que quanto maior o  $\theta$ , menor será a  $\rho$  (Samouëlian et al., 2005). Além do  $\theta$ , a  $\rho$  está relacionada com a viscosidade da água (Samouëlian et al., 2005) e com os íons presentes na solução do solo (Scollar et al., 1990; Calamita et al., 2012). A  $\rho$  também sofre mudanças mais amplas em solos parcialmente saturados (Fukue et al., 1999).

As partículas de argila possuem grande superfície específica, relativamente a silte e areia, por isso, maior capacidade de adsorção de íons no solo, apresentando assim maior condutância elétrica do que as partículas de maiores (Calamita et al., 2012). Portanto, o aumento da quantidade de argila no solo causa a redução da sua  $\rho$  (Jackson et al. 1978; Fukue et al., 1999; Becegato 2005; Hadzik et al., 2011; Calamita et al., 2012;). Essas relações entre  $\rho$  e a textura do solo foram realizadas para solos de clima temperado, sendo necessário mais

estudos para solos de clima tropical onde a mineralogia da argila pode ser relevante nessa relação (Melo et al., 2021).

Hadzik et al. (2011), em um experimento realizado em um Argissolo de textura média onde foram coletadas amostras deformadas em 12 profundidades, encontraram que a relação entre  $\rho$  e  $\theta$  no solo é mais forte em camadas mais profundas do solo, isso porque o pH não varia e o conteúdo de argila em profundidade é maior, tornando a  $\rho$  mais sensível ao  $\theta$ ; ainda, os resultados dos autores coincidiram para uma relação inversa entre conteúdo de argila e  $\rho$ .

Banton et al. (1997) obtiveram correlação de 0,64 e 0,53 para a  $\rho$  em solo argiloso úmido e seco, respectivamente. Nascimento et al., (2001) e Nascimento et al., (2003) encontraram que uma variação de 10% no teor de areia fina pode causar variações de até 10000  $\Omega.m$  em Latossolos.

De acordo com Fukue et al. (1999) é possível caracterizar a estrutura do solo por meio da sua  $\rho$ , sendo que agregados grandes apresentam menores  $\rho$ , enquanto agregados pequenos possuem maiores  $\rho$  (Séger et al., 2009). A TRE tem alta capacidade de detectar a densidade do solo e ambas possuem relação inversa, ou seja, quando a densidade do solo aumenta a  $\rho$  diminui (Hadzik et al., 2011). Geralmente macroporos e matéria orgânica causam o aumento da  $\rho$  (Besson et al., 2013), contudo, Hadzik et al. (2011) não inseriram o conteúdo de carbono orgânico em equações de pedotransferência para estimar a  $\rho$ , isso porque os melhores modelos de pedotransferência, de acordo com o índice AIC (Critério de Informação de Akaike), não levavam em consideração o conteúdo de carbono orgânico do solo (COS).

A relação entre temperatura e  $\rho$  também é inversa, ou seja, quando a temperatura aumenta a  $\rho$  diminui (Samouëlian et al., 2005; Musgrave et al., 2011). A temperatura do solo é uma das variáveis mais importantes, porque tem grande influência na mobilidade iônica do solo, influenciando assim na  $\sigma$  (Rein et al., 2004). Segundo Rein et al. (2004), a variação do  $\theta$  e da temperatura na superfície do solo são os dois fatores que mais influenciam na  $\rho$ , seguidas da variação da temperatura da água e da quantidade de íons no solo.

As mudanças na temperatura do solo estão relacionadas com a mobilidade iônica e a viscosidade da água. Essas mudanças podem ocorrer de acordo com as estações do ano ou ao longo do dia. (Samouëlian et al., 2005; Jayawickreme et al., 2010). Quando o objetivo de pesquisa é comparar mapas de  $\rho$ , se houver grandes mudanças de temperatura ao longo da coleta dos dados, essa temperatura deve ser corrigida em relação à  $\rho$  segundo equação elaborada por Campbell et al. (1948):



$$\rho_T = \rho_{25^\circ C} [1 + \alpha (T - 25^\circ C)] \quad (1)$$

onde:  $\alpha$  = fator de correção (0,02);  $\rho_{25^\circ C}$  = resistividade elétrica à 25°C; T = temperatura calculada.

Segundo Jayawickreme et al. (2010), mudanças de temperatura por conta de diferentes estações do ano influenciaram entre 20% e 45% a  $\rho$ . Keller & Frischknecht (1966) e Schön (1996) propuseram que a cada 1°C alterado na temperatura do solo, a resistividade varia em 2.5%. Rein et al. (2004) verificaram que as variações de temperatura na superfície do solo podem ter maior influência sobre sua  $\rho$  do que o  $\theta$  do solo, além disso, concluíram que mudanças diurnas na temperatura do solo também têm efeito na sua  $\sigma$ . Hayley et al. (2007) afirmaram que a temperatura tem grande influência na subsuperfície do solo e que mudanças na mesma causa maiores variações na  $\sigma$  do solo do que mudanças causadas pelos solutos, compostos químicos ou  $\theta$ .

Arps (1953) estudou o efeito da temperatura na  $\rho$  de um solo saturado com diferentes concentrações de cloreto de sódio (NaCl). Nesse estudo foi utilizado concentrações de 60, 100, 300, 1.000, 3.000, 6.000, 10.000, 30.000, 100.000 e 200.000ppm de NaCl para as temperaturas de 32°, 64,4°, 77°, 284° e 321,8°F (0, 18, 25, 140 e 161 °C), tendo como resultado uma relação inversa entre a  $\rho$  e a concentração de solutos.

Iezzi (2008) também analisou a relação entre concentração de solutos e  $\rho$ , com as seguintes concentrações de NaCl: 3,0; 2,7; 2,1; 1,8; 1,5; 1,2; 0,9; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,07gL<sup>-1</sup>. A autora verificou que as concentrações acima de 3,0gL<sup>-1</sup> tinham como resultado uma  $\rho$  muito baixa, necessitando de uma alta corrente elétrica. Os resultados desse experimento mostraram que quando se aumenta as concentrações de NaCl, a  $\sigma$  cresce e a resistividade elétrica aparente diminui.

Para Jayawickreme et al. (2010), é difícil avaliar mudanças na concentração de solutos no solo por meio da  $\rho$  por conta das suas relações complexas com sais, textura e  $\theta$ . Apesar disso, quando todos os poros do solo estão saturados com água tem-se uma condição de padronização das amostras de solo, portanto a  $\rho$  vai variar em função de outros fatores, por exemplo, da quantidade de sais presentes no solo, sendo assim possível avaliar a salinidade de um solo no espaço e no tempo (Nosseto et al., 2013).

Jayawickreme et al. (2011) avaliou a relação entre o uso do solo com floresta nativa e áreas de agricultura, essas sendo cultivadas por 6 a 90 anos, em relação a sua  $\rho$ . Foi estudada a influência da concentração de água e sal na  $\rho$  utilizando-se em laboratório concentrações que corresponderam a 5060, 1666, 292, e 241 $\mu$ Scm<sup>-1</sup>. Para uma área com mais de 70 anos de

agricultura onde houve perda de sais, os autores concluíram que a  $\rho$  foi maior do que as áreas de floresta.

Nascimento et al. (2008) verificaram que a adição de fertilizantes no solo diminuiu cerca de dez vezes os valores de  $\rho$ , sendo que nas parcelas com adição de fertilizante foi obtido um valor máximo e mínimo de 15870 e 146  $\Omega.m$ , respectivamente, enquanto a área natural de Cerrado apresentou  $\rho$  média de 42759  $\Omega.m$ . Além disso, nesse estudo também foi possível diferenciar áreas com aplicação de superfosfato triplo ( $>4000 \Omega.m$ ) e áreas com KCl (2000-4000  $\Omega.m$ ) devido aos valores contrastantes de  $\rho$ .

Em relação a composição química do solo, como a  $\rho$  é influenciada pelo  $\theta$  e concentração iônica do solo, a nutrição de plantas pode ser verificada no espaço e no tempo (Samouëlian et al., 2005), tornando-se uma ferramenta eficaz em agricultura de precisão.

Em relação ao pH, Hadzik et al. (2011) mostraram que o aumento do pH no solo coincidiu com o aumento da  $\rho$  e que com o aumento do pH houve a queda da sensibilidade da  $\rho$  em mudar com o  $\theta$  do solo. Assim, concluíram que o pH do solo pode refletir mudanças na mineralogia do solo, principalmente a mudança para minerais com menor condutância elétrica. Maior correlação entre pH e  $\rho$  do que  $\rho$  e matéria orgânica foi observado, resultando em equações de pedotransferência para determinar a  $\rho$  por meio do pH, areia, densidade do solo, argila e  $\theta$ .

## 2.4 Concentração de solutos no solo

A concentração de solutos no solo é também modificada com os processos de contaminação do solo, seja com resíduos vegetais como a vinhaça ou por chorume em áreas de aterro sanitário (Cruz et al., 2008; Laureano & Shiraiwa, 2008). O aumento da concentração de solutos no solo também pode acontecer devido aos processos de gênese do solo, como ocorre em Planossolos Nátricos, e em áreas agrícolas devido ao manejo inadequado da irrigação ou por conta das operações de correção e fertilização do solo (Nascimento et al., 2008; Carmo, 2014; EMBRAPA, 2018).

O aumento da concentração de solutos no solo, que comumente é avaliado medindo a  $\sigma$ , afeta a capacidade das plantas em absorver água e nutrientes do solo, comprometendo a sua germinação e desenvolvimento (Bernert et al., 2015; Tavares et al., 2021). Em áreas agrícolas o valor limite da  $\sigma$  é de  $40mSm^{-1}$  (EMBRAPA, 2006), quando o solo se apresenta

contaminado, a  $\sigma$  do solo ficará elevada representando a maior quantidade de íons presente no solo (Laureano & Shiraiwa, 2008).

A  $\sigma$  também tem sido utilizada para identificar áreas de aterro sanitário contaminadas com chorume e com resíduos vegetais, como a vinhaça. Essas contaminações são identificadas quando as áreas apresentam maior  $\sigma$  no solo (Cruz et al., 2008; Laureano & Shiraiwa, 2008; Rowe & Cardoso, 2009).

Fachin et al. (2006) ao avaliarem áreas sob aterro sanitário elaboraram uma classificação dessas áreas quanto a contaminação a partir da Condutividade Elétrica aparente ( $\sigma_a$ ). Áreas não contaminadas mostraram  $\sigma_a < 20\text{mSm}^{-1}$ , áreas com suspeita de contaminação apresentaram  $\sigma_a$  entre 20 e  $40\text{mSm}^{-1}$  e áreas potencialmente contaminadas apresentaram  $\sigma_a > 40\text{mSm}^{-1}$ . Essas áreas obtiveram valores de  $\rho > 50$ , de 30 a 50 e  $< 30 \Omega.m$ , respectivamente.

Laureano & Shiraiwa (2008) encontraram valores de  $\sigma$  em áreas próximas a aterros sanitários para áreas não contaminadas entre 4 e  $16\text{mSm}^{-1}$ , sendo a média de  $12\text{mSm}^{-1}$ . Áreas contaminadas têm maiores valores de  $\sigma$  devido à grande quantidade de íons presente no chorume de aterros sanitários. Rowe & Cardoso (2009) viram que áreas que tiveram contato com o chorume, não passando pelo processo de impermeabilização, tiveram maiores valores de  $\sigma$ , evidenciando a sua contaminação.

Em sistema de fertirrigação a  $\sigma$  também pode ser utilizada para quantificar a concentração de solutos presentes no solo (Cameira et al., 2014). Nesses sistemas, a  $\sigma$  do solo está diretamente relacionada com a quantidade de fertilizantes (Cuartero & Muñoz, 1999) e com a calagem no solo, com isso a  $\sigma$  pode ser utilizada como preditora do índice de fertilidade do solo, necessidade de calagem e do poder tampão de acidez do solo (Carmo, 2014). A  $\sigma$  do solo também é capaz de identificar seus materiais, sendo que minerais metálicos apresentam maior  $\sigma$ , água e sal apresentam valores de  $\sigma$  intermediários e o ar do solo apresentam valores de  $\sigma$  baixos (Samouëlian et al., 2005). Em sistema de fertirrigação, a  $\sigma$  da água de irrigação não deve ser superior a  $200\text{mSm}^{-1}$ , com pressão osmótica entre 70 e 100kPa, sendo que apenas plantas com tolerância à salinidade se desenvolvem em ambientes com concentração de solutos superior a essa (Oliveira et al., 2015).

A  $\sigma$  do solo é influenciada pelo tipo de íons presentes na solução e sua quantidade (Bernert et al., 2015) e está relacionada com aspectos químicos e físicos do solo. Mudanças nesses fatores causam alteração na capacidade do solo em conduzir ou de resistir a transmissão de eletricidade (Tavares et al., 2018). Portanto, a  $\sigma$  pode ser utilizada como um indicador de propriedades e características do solo, como salinidade, capacidade de troca

catiônica (CTC),  $\theta$ , densidade do solo (Corwin & Lesch, 2005), textura (Sudduth et al., 2005; Becegato 2005; Borba et al., 2015), compactação, mineralogia (Borba et al., 2015), matéria orgânica (Jaynes, 1996) e profundidade da camada de impedimento (Doolittle et al., 1994; Clark et al., 2000).

Em relação a matéria orgânica, Wang et al. (2014) verificaram que o uso de composto orgânico em uma área de solo salino diminuiu 87% a  $\sigma$  do solo. Shen et al. (2019) em um experimento utilizando subprodutos que contém silício, cálcio, magnésio e potássio, em comparação com a cal, observaram que a aplicação dos subprodutos e da cal aumentaram o pH do solo e a  $\sigma$ . Observaram também que com o aumento da  $\sigma$ , houve aumento da biomassa microbiana no solo.

## 2.5 Medição do conteúdo de água do solo a partir da resistividade elétrica

Para estimar o  $\theta$  com os mapas 2D ou 3D de  $\rho$ , é necessário fazer uma calibração entre o  $\theta$  obtido pelo método padrão de determinação de umidade (método da estufa) e a  $\rho$ , que terão uma relação petrofísica (Jayawickreme et al., 2008; Samouëlian et al., 2005). A calibração entre  $\theta$  e  $\rho$  geralmente é feita em laboratório, com o objetivo de obter essa relação em condições controladas. Somente depois de devidamente calibrado, a metodologia de medições de  $\rho$  em campo pode ser usada para estimar as propriedades do solo *in situ* (Samouëlian et al., 2005).

A “Lei de Archie” (Archie, 1942) é a equação mais relevante para relacionar o  $\theta$  com a  $\rho$ . Essa equação empírica se ajusta a solos de textura média a arenosa, mas não é adequada para solos com textura mais fina (Calamita et al., 2012). Os mesmos autores ajustaram modelos de regressão linear e logarítmica entre o  $\theta$  e a  $\rho$ , obtendo-se resultados que corroboraram com a Lei de Archie. Contudo, quando todos os dados foram juntados o modelo linear foi suficiente para explicar a relação  $\theta$ - $\rho$ , não sendo necessárias equações mais elaboradas.

Por outro lado, Melo et al. (2021) testaram a Lei de Archie e um modelo exponencial e logarítmico para a relação entre  $\theta$ - $\rho$  em Latossolo Vermelho-Amarelo com diferentes níveis de compactação e verificaram que a Lei de Archie apresentou melhor desempenho. No entanto, esse modelo ainda não foi testado em outras classes de solos com diferentes níveis de intemperismo, como ocorrem em solos de clima tropical.

**REFERÊNCIAS**

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. D. M., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., Gomez, J. A., Lovelli, L., Ferreira Gomes, J. J. (2009). Multielectrode 3D resistivity imaging of alfalfa root zone. *European Journal of Agronomy*, 31(4), 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.08.005>
- Archie, G. E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54–62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
- Arps, J. J. (1953). The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions. *Journal of Petroleum Technology*, 5(10), 17-20. <https://doi.org/10.2118/953327-G>
- Banton, O., Seguin, M. K., Cimon, M. A. (1997). Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Science Society of American Journal*, 61(4), 1010-1017. <https://doi.org/10.2136/methods-soil.2015.0038>
- Barros, M. D. F., Fontes, M. P., Alvarez V. V. H., Ruiz, H. A. (2004). Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8(1), 59-64. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000100009>
- Becegato, V. A. Aplicação de técnicas geofísicas e geoquímicas em duas glebas agrícolas do noroeste do estado do Paraná e suas relações com fertilizantes fosfatados. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 198p, 2005.
- Bernert, M. R., Eschemback, V., Jadoski, S. O., Santos Lima, A. D., Pott, C. A. (2015). Características do pH e condutividade elétrica no manejo de fertirrigação. *Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science*, 8(1), 80-87.
- Beson, A., Sger, M., Giot, G., Cousin, I. (2013). Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma*, 204, 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.010>
- Borba, M. Z., Silva F. O., Trevisan, R. G., Eitelwein, M. T., Molin, J. P. Condutividade elétrica aparente no mapeamento da textura do solo. 2015.
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., Moramarco, T. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, 454, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>
- Cameira, M. R., Pereira, A., Ahuja, L., Ma, L. (2014). Sustainability and environmental assessment of fertigation in an intensive olive grove under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 146, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.007>

Campbell, R. B., Bower, C. A., Richard, L. A. (1948). Change in electrical conductivity with temperature and the relation with osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Science Society of America Journal*, 13. 33–69. <https://doi.org/10.2136/sssaj1949.036159950013000C0010x>

Carmo, D. L. Condutividade elétrica e sua relação com a fertilidade de solos tratados com corretivos e resíduos orgânicos. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 168p, 2015.

Clark, R.L., Kissel, D., Chen, F., Adkins, W. (2000). Mapping soil hardpans with the penetrometer and electrical conductivity. Proceedings of Fifth International Conference on Precision Agriculture (CD), July 16–19, 2000. Bloomington, MN, USA.

Corwin, D. L. & Lesch, S. M. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*. 46(1-3). 11-43. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>

Cruz, J. I. D., Portugal, R. D. S., Lucendo, M., Elis, V. R., Fachin, S. J. D. S., Ustra, A. T., Borges, W. R. (2008). Detecção de contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletrorresistividade. *Revista brasileira de geofísica*, 26(4), 481-492. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000400008>

Cuatero, J., Muñoz, R. F. (1999). Tomato and salinity. *Scientia Horticulture*, 78(1-4). 83-125. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00191-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00191-5)

Curi, N., Silva, S. H., G.; Poggere, G. C., Menezes, M. D. (2017). Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais. Lavras: Ed. UFLA, 147p.

Dane JH, Topp GC (eds). 2002. Methods of soil analysis. Part 4: Physical methods. Soil Science Society of America Books Series: 5. Madison, WI: Soil Science Society of America.

Dick, J., Tetzlaff, D., Bradford, J., Soulsby, C. (2018). Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. *Journal of hydrology*, 559, 684-697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.062>

Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021>

Doolittle, J. A., Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Indorante, S. J. (1994). Estimating depths to clay pans using eletromagnetic induction methods. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(6), 572-5.

EMBRAPA. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*. Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola. Jaguariúna, 2006. 8 p.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa, 2018.

Evett, S. R., Tolk, J. A., Howell, T. A. (2006). Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose Zone Journal*, 5, 894-907. <https://doi.org/10.2136/VZJ2005.0149>

Fachin S. J. S., Huber F., Shiraiwa S., Borges W. R., Migliorini R. B. (2006) Aplicação de métodos geofísicos para identificar áreas contaminadas por resíduos de um curtume. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(1), 129-138. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2006000100010>

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., Taya, N. (1999). The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering geology*, 54(1-2), 43-53. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00060-5)

Hadzick, Z. Z., Guber, A. K., Pachepsky, Y. A., Hill, R. L. (2011). Pedotransfer functions in soil electrical resistivity estimation. *Geoderma*, 164, 195-202. [10.1016/j.geoderma.2011.06.004](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.004)

Hayley, K., Bentley, L. R., Gharibi, M., Nightingale, M. (2007). Low temperature dependence of electrical resistivity: implications for near surface geophysical monitoring. *Geophysical Research Letters*. 34(18). <https://doi.org/10.1029/2007GL031124>

Iezzi, Patricia Braga Toledo. Testes de aplicabilidade de sonda de eletrorresistividade na avaliação de salinização secundária de solos. 2008. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 2008.

Jayawickreme, D. H., Van Dam, R. L., & Hyndman, D. W. (2008). Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions. *Geophysical Research Letters*, 35(18). <https://doi.org/10.1029/2008GL034690>

Jackson, P. D., Taylor Smith, D., Stanfords, P. N. (1978). Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sand. *Geophysics* 43 (3), 1250-1268. <https://doi.org/10.1190/1.1440891>

Jayawickreme D. H., Dam R. L. V., Hyndman D. W. (2010). Hydrological consequences of land-cover change: quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. *Geophysics*, 75(4), WA43-WA50. <https://doi.org/10.1190/1.3464760>.

Jayawickreme, D. H., Santoni, C. S., Kim, J. H., Jobbagy E. G., Jackson, R. B. (2011). Changes in hydrology and salinity accompanying a century of agricultural conversion in Argentina. *Ecological Applications*, 21(7), 2367-2379. <https://doi.org/10.1890/10-2086.1>

Jayawickreme, D. H., Van Dam, R. L., & Hyndman, D. W. (2008). Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions. *Geophysical research letters*, 35(18). <https://doi.org/10.1029/2008GL034690>

Jaynes, D. B. (1996). Improved soil mapping using electromagnetic induction surveys. P169-179. In P.C. Robert et al. (ed.) Proc. 3<sup>rd</sup>. Int. Conf. on Precision Agriculture, Minneapolis. 23-26 June. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

Jeřábek, J., Zúmr, D., Dostál, T. (2017). Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 174, 231–240. doi: 10.1016/j.still.2017.07.008

Keller, G. V., Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*.

Laureano, A. T., Shiraiwa, S. (2008). Ensaio geofísico no aterro sanitário de Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(2), 173-180. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000200005>

Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of applied geophysics*, 95, 135-156. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.02.017>

McBride R. A., Gordon A. M., Shrive S. C. (1990). Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 54, 290–293. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400010047x>

Melo, L. B. B., Silva, B. M., Peixoto, D. S., Chiarini, T. P. A., Oliveira, G. C., Curi, N. (2021). Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 208, 104876. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01309.x

Molin, J. P., Rabello, L. M. (2011). Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Engenharia Agrícola*, 31(1), 90-101. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000100009>

Molin, J. P., Gimenez, L. M., Pauletti, V., Schmidhalter, U., Hammer, J. (2005). Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. *Engenharia Agrícola*, 25(2), 420-426. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162005000200015>

Musgrave, H., Binley, A. (2011). Revealing the temporal dynamics of subsurface temperature in a wetland using time-lapse geophysics. *Journal of Hydrology*, 396(3–4), 258–266. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.11.008

Nascimento C. T. C., Pires, A. C. B., Moraes, R. A. V. (2003). Variação sazonal da resistividade em latossolos. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Anais, CD-ROM, 8(1).

Nascimento C. T. C., Varella R. F., Pires A. C. B., Santos R. V. (2001). Valores de resistividade elétrica em um latossolo do Distrito Federal. Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Anais, CD-ROM, 7(1).

Nascimento, C. T. C. D., Ferreira, F. J. F., Andrade, L. R. M. D., Gaspar, J. C., Pires, A. C. B. (2008). Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes agrícolas no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1), 21-29. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100002>



- Nosetto M. D., Acosta A. M., Jayawickreme D. H., Ballesteros S. I., Jackson R. B., Jobbagy E. G. (2013). Land use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina. *Agricultural Water Management*, 129, 120–129. doi:10.1016/j.agwat.2013.07.017
- Oliveira, F. A., Duarte, S. N., Medeiros, J. F., Dias, N. S., Oliveira, M. K.T., Silva, R. C. P., Lima, K. S. (2015). Nutrição mineral do pimentão submetido a diferentes manejos de fertirrigação. *Horticultura Brasileira*, 33(2), 216-223. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620150000200013>
- Orellana E. (1972). *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523p.
- Paglis, C. M. (2013). Application of electrical resistivity tomography for detecting root biomass in coffee trees. *International Journal of Geophysics*, 2013. doi:10.1155/2013/383261
- Rein A., Hoffmann, R., Dietrich, P. (2004). Influence of natural time-dependent variations of electrical conductivity on DC resistivity measurements. *Journal of hydrology*, 285(1-4), 215-232. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.08.015>
- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., Alves, W. J. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 433–439. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300020020x>
- Richards, L.A. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Handbook No 60 (1947), 157pp.
- Rinaldi, V. A., Cuestas, G. A. (2002). Ohmic conductivity of a compacted silty clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), 824–835. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:10(824)
- Robinson, D. A., Campbell, C. S., Hopmans, J. W., Hornbuckle, B. K., Jones, S. B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J., Wendroth, O. (2008). Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*, 7(1), 358–389. doi:10.2136/vzj2007.0143
- Rowe, E. J., Cardoso, D. L. (2009). A utilização de mapas temáticos no diagnóstico de áreas suscetíveis à contaminação por percolado de aterro sanitário. *Engenharia Agrícola*, 29(4), 670-678. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000400017>
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>
- Schön, J. H. (1996). *Physical Properties of Rocks. Fundamentals and Principles of Petrophysics*. Handbook of Geophysical Exploration. Section I, Seismic Exploration, vol. 18. Pergamon Press. 583 pp.
- Scollar, I., Tabbagh, A., Hesse, A., Herzog, I. (1990). *Archaeological Prospecting and Remote Sensing*.

Seaton, W. J., Burbey, T. J. (2002). Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. *Journal of Applied Geophysics*, 51(1), 21–41. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(02\)00212-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00212-4)

Séger, M., Cousin, I., Frison, A., Boizard, H., Richard, G. (2009). Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.003>

Shen, Y., Lin, H., Song, X., Liu, P., Bo, L., Chen, J., Yang, L. (2019). Short-term effects of byproduct amendments and lime on physicochemical and microbiological properties of acidic soil from Jaodong Peninsula of China. *Ciência Rural*, 49(6). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20180098>

Silva, B. M., Oliveira, G. C. D., Serafim, M. E., Silva Júnior, J. J. D., Colombo, A., Lima, J. M. D. (2012). Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com café. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(2), 277-286. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000200017>

Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., ... Thelen, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3), 263-283. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.010>

Tavares, D. S., Fernandes, T. E. K., Rita, Y. L., Rocha, D. C., Sant'anna-Santos, B. F., Gomes, M. P. (2021). Germinative metabolismo and seedling growth of cowpea (*Vigna unguiculata*) under salt and osmotic stress. *South African Journal of Botany*, 139, 399-408. doi:10.1016/j.sajb.2021.03.019

Tavares, T. R., Eitelwein, M. T., Trevisan, R. G., Maldaner, L. F., Molin, J. P. (2018). Sensoriamento proximal do solo: o estado da arte em solos tropicais brasileiros.

Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E., Keys D. A. (1985). *Applied Geophysics*. Cambridge, Cambridge University Press.

Wang, L., Sun, X., Li, S., Zhang, T., Zhang, W., Zhai, P. (2014). Application of organic amendments to a coastal saline soil in North China: Effects on soil physical and chemical properties and tree growth. *PLoS One*, 9(2), e89185. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089185>

## ARTIGO 1

### O efeito da concentração de solutos na relação umidade do solo–resistividade elétrica em solos tropicais

#### RESUMO

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) é uma propriedade do solo que pode ser usada para estimar o seu conteúdo de água ( $\theta$ ), sendo influenciada por parâmetros químicos e físicos do solo. A estimativa do  $\theta$  por meio da  $\rho$  ( $\Omega.m$ ), embora demonstrada em diversos estudos, ainda não foi estudada para solos com diferentes concentrações de solutos e graus de intemperismo, o que pode comprometer a estimativa. A hipótese desse trabalho é que com o aumento da concentração de solutos no solo há mais influência dessa na  $\rho$  do que o  $\theta$ , dificultando, assim, o monitoramento do  $\theta$  acarretando sua superestimação, e que esse efeito mantém relação com o grau de intemperismo e o tipo de sensor utilizado para medição. Portanto, o objetivo geral desse estudo foi estudar a relação entre  $\theta$ - $\rho$  com diferentes concentrações de solutos em três solos tropicais pedologicamente contrastantes e os objetivos específicos foram: (1) avaliar a influência da concentração de solutos na solução do solo sob a relação  $\theta$ - $\rho$ ; (2) identificar qual tipo de sensor (resistivímetro ou de capacitância) estima  $\theta$  com maior acurácia; e (3) identificar as variáveis com maior sensibilidade à  $\rho$ . Amostras com estrutura preservada de três solos - Typic Dystrustept, Rhodic Hapludult e Rhodic Hapludox. As amostras foram submetidas a 5 tratamentos, sendo um controle e 4 tratamentos para promover o aumento da condutividade elétrica ( $\sigma$ ), para 10, 15, 25 e 50  $dSm^{-1}$ , em 4 repetições. Inicialmente, as amostras foram saturadas com as soluções contendo 55, 110, 275 e 550g de NaCl  $L^{-1}$ . Em seguida, foram realizadas leituras de temperatura,  $\sigma$  e  $\theta$  com sensor de capacitância,  $\rho$  com resistivímetro por meio de arranjo de 4 eletrodos, e  $\theta$  pelo método padrão de estufa a 105 °C. Os dados de  $\theta$ ,  $\rho$  e  $\sigma$  foram ajustados à modelos matemáticos que foram comparados de acordo com o  $R^2$ , a raiz do erro médio quadrático (RMSE), AIC e correlação de Pearson. O modelo potencial foi o que melhor descreveu a relação  $\theta$ - $\rho$  para solos com condutividade elétrica até 25  $dS m^{-1}$ . Acima desse valor, os modelos polinomial e logarítmico evidenciaram melhor ajuste dos dados. A  $\rho$  foi capaz de separar melhor os tratamentos na condição de solo saturado do que a  $\sigma$ , e as variáveis relacionadas com a concentração de solutos foram as mais sensíveis à  $\rho$ . Ainda, a concentração de solutos influenciou mais a  $\rho$  do que  $\theta$ . Portanto, a  $\rho$  é capaz de estimar  $\theta$  com acurácia em solos com diferentes concentrações de solutos e tem potencial para ser utilizada em solos com concentrações variáveis de solutos e graus de intemperismo. Concluímos que a  $\rho$  foi mais influenciada pela concentração de solutos no solo do que por  $\theta$ , e que o aumento da concentração de solutos no solo acarreta a superestimativa de  $\theta$  no solo.

**Palavras-chave:** sensores proximais; conteúdo de água no solo; salinidade do solo.

## 1. Introdução

A resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ) mede a dificuldade da passagem da corrente elétrica no solo (Nascimento et al., 2008) e é influenciada por diversos fatores, como o conteúdo de água volumétrico ( $\theta$ ), pH, densidade do solo, textura, carbono orgânico (Hadzik et al., 2011; Calamita et al., 2012), composição química do solo (Rhoades et al., 1989; Rinaldi & Cuestas, 2002), temperatura (Jayawickreme, 2010), estrutura do solo (Fukue et al., 1999; Séger et al., 2009; Melo et al., 2021) e concentração de solutos (Jayawickreme et al., 2011).

Um das principais aplicações da medição da  $\rho$ , é a estimativa indireta do  $\theta$ , após calibração (Calamita et al., 2012; Dick et al., 2018). O conhecimento do  $\theta$  é importante no contexto do manejo agrícola, com uso eficiente de água na irrigação, recarga hidrológica, prevenção de degradação das terras por compactação e erosão (Letey, 1985; Andhikari e Hartemink, 2016; Peixoto et al. 2019; Lehmann et al., 2020). Além disso, a medição da  $\rho$  também já foi explorada para medições indiretas de outros fatores que influem em seu resultado, como avaliação da compactação do solo (Jerábek et al., 2017; Romero-Ruiz et al., 2018; Melo et al., 2021). Nesse sentido, há possibilidade de medição da  $\rho$  para estimar outros fatores/propriedades importantes no entendimento e manejo de solo e água.

A obtenção do  $\theta$  em campo é tradicionalmente obtida a partir de constante dielétrica por meio de sensores como o reflectometria no domínio da frequência (FDR) e o reflectometria no domínio do tempo (TDR) (Silva et al., 2012). A constante dielétrica muda de acordo com os componentes do solo: para a água, apresenta valores próximos de 80; para os minerais e materiais orgânicos do solo, está entre 2-9; e para o ar é igual a 1. Assim, a constante dielétrica é bastante influenciada pelo  $\theta$  (Silva et al., 2012; Ramos et al., 2014). Esses sensores FDR e TDR vêm com calibrações de fábrica, que são equações usadas para estimar o  $\theta$  no solo. No entanto, esses sensores requerem calibrações específicas para cada solo, principalmente em solos tropicais (Silva et al., 2012).

Os sensores FDR podem ser usados para fazer diversas leituras em uma área e em curto período, enquanto os sensores TDR precisam ficar fixos no solo, não possibilitando leituras em áreas diferentes, o que eleva os custos da operação (Ramos et al., 2014). Esses sensores possibilitam ao operador maior segurança, facilidade de operação, além de serem métodos não-destrutivos (Coelho et al., 2006; Cruz et al., 2018). Algumas desvantagens são a necessidade de calibração específica e a sensibilidade do sensor quanto ao tipo de solo, textura, salinidade e temperatura (Gasch et al., 2017; Pizetta et al., 2017).

A  $\rho$  pode ser medida por meio dos métodos geofísicos, como a TRE. Este método não é destrutivo, é sensível às variações espaciais do solo e não exige a abertura de trincheiras para aquisição dos dados. A necessidade de calibração e inversão dos dados consistem em suas limitações (Samouëlian et al., 2005; Loke et al., 2013). Diferindo do método padrão e dos outros métodos muito utilizados para medição do  $\theta$ , como a reflectometria no domínio do tempo e da frequência (TDR e FDR, respectivamente), os métodos geofísicos permitem medições com diferentes resoluções, em profundidades superiores a 10 metros (Samouëlian et al. 2005; Calamita et al., 2012; Noretto et al., 2013; Dick et al., 2018; Cimpoiașu et al., 2020), possibilitando a geração de mapas em 1D (sondagem vertical), 2D ou 3D que permitem estudos de variabilidade espacial e temporal da  $\rho$  em campo, a partir da medição da corrente elétrica e potencial elétrico com diferentes arranjos (Samouëlian et al. 2005; Loke et al., 2013). Com o avanço na construção de sensores proximais para medições de propriedades eletromagnéticas do solo e locação desses sensores em implementos agrícolas (Karlen et al. 2019; Bottega et al., 2021), outras propriedades do solo necessárias para avaliação da saúde

do solo têm sido estimadas por esse método, como o teor de carbono orgânico (Longo et al., 2020) e níveis de N devido fertilizações (Blanchy et al., 2020).

A concentração de solutos é um fator conhecido por interferir na  $\rho$ , mas tem sido principalmente estudado em solos naturalmente salinos (Samouelian et al., 2005; Jayawickreme et al., 2011). A relação  $\theta$ - $\rho$  ainda não foi estudada em solos com alta concentração de solutos (Calamita et al., 2012) e com diferentes graus de intemperismo, que afeta a concentração de solutos. O incremento na concentração de solutos no solo pode ser resultado de diferentes práticas agrícolas como correção de acidez no solo (Carmo & Silva, 2016), adubação (Pires et al., 2008; Abreu Junior et al., 2000), fertirrigação (Bryla et al., 2008), contaminação do solo com íons e metais (Ahmed & Sulaiman, 2001; Laureano & Shiraiwa, 2008); ou, ainda, áreas em condição natural que acumulam sais devido ao clima, topografia e uso da terra (Jayawickreme et al., 2011; Nosetto et al., 2013; Duan et al., 2021).

Estudos têm mostrado redução na  $\rho$  em função do aumento da concentração de solutos no solo (Nascimento et al., 2008; Jayawickreme et al., 2011). Esse efeito é importante porque pode influenciar a relação entre  $\theta$ - $\rho$ , constituindo em fonte de erro ao usar o método da TRE para quantificar o  $\theta$  (Samouelian et al. 2005; Hadzik et al. 2011; Dick et al., 2018), como já observado em trabalhos com outros sensores TDR e FDR (Evelt et al., 2006; Silva et al., 2012). Por outro lado, a sensibilidade a variação da concentração de solutos por sensores de medição de  $\rho$  pode possibilitar aplicações práticas; como o manejo da fertilidade do solo em sistemas agrícolas ou diagnóstico de contaminação por íons, permitindo acessar a qualidade do solo e melhorar o manejo sustentável do ambiente (Karlen et al., 2019).

Assim, a hipótese do trabalho foi que com o aumento da concentração de solutos em solos com diferentes graus de intemperismo, a concentração de solutos influencia a  $\rho$  mais do que o  $\theta$ , dificultando o monitoramento de  $\theta$  por meio da  $\rho$  em solos com alta concentração de solutos. Os objetivos foram: (1) avaliar a influência da concentração de solutos na solução do solo sob a relação  $\theta$ - $\rho$ ; (2) identificar qual sensor estima  $\theta$  com maior acurácia; e (3) identificar atributos químicos e físicos do solo com maior sensibilidade à  $\rho$ .

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido utilizando solos de uma área experimental da Universidade Federal de Lavras, município de Lavras, Sul de Minas Gerais, Brasil. O clima regional é classificado como subtropical de altitude (Cwb), com invernos frios e secos e verões quentes e úmidos de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013). O período chuvoso ocorre de novembro a janeiro. A precipitação anual média é de 1339 mm e a temperatura anual média da região é de 21,6°C.

Os solos selecionados foram classificados por Santos et al. (2014) como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe) coordenadas 21°13'45,00" S; 44°59'2,86" O, ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico (PVd) coordenadas 21°13'51,71" S; 44°58'52,10" O e LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe) coordenadas 21°13'55,88" S; 44°58'57,48" O – WGS84 (Curi et al., 2017), correspondem, respectivamente, a Typic Dystrustept, Rhodic Hapludult e Rhodic Hapludox segundo a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). Esses tipos de solos apresentam elevada representatividade e compõem cerca de 63.7% do território brasileiro (Santos et al., 2011). O

material de origem predominante associado aos CXbe e PVd é o granito-gnaise leucocrático (GgL) e para LVe, o granito-gnaise mesocrático (GgM).

Os solos da área experimental estão em sistema de pousio por 7 anos, sendo que os cultivos anteriores ao pousio consistem em pomar com maracujazeiro no PVd, cultura da banana no CXbe e a viticultura no LVe. Após a retirada dessas culturas foi realizado o controle das plantas daninhas com herbicida ou roçadeira mecânica. A Tabela 1 apresenta a caracterização química e física dos solos.

**Tabela 1**

Caracterização química e física dos três solos avaliados, no horizonte A, na camada de 0 a 10 cm.

Solo		CXbe	PVd	LVe
Propriedades químicas				
pH	H <sub>2</sub> O	6,3	6,0	6,9
	CaCl <sub>2</sub>	5,7	5,4	6,3
P-Mehlich-1		10,2	2,3	9,3
P-resina	mg dm <sup>-3</sup>	18,3	9,8	8,7
K-Mehlich-1		67,6	120,0	55,9
Na		163,5	81,7	87,0
Ca		3,9	3,8	4,0
Mg	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	0,9	1,0	1,0
Al		0,0	0,0	0,0
H + Al		2,2	2,3	1,5
CTC <sub>7</sub>		7,3	7,4	6,6
CO		1,4	1,8	1,1
MOS	%	2,4	3,1	1,9
V		69,4	69,1	77,4
m		0,0	0,0	0,0
Propriedades físicas				
Ds	kg m <sup>-3</sup>	1380	1110	1320
Dp		2550	2530	2640
Areia		418	406	296
Silte	g kg <sup>-1</sup>	165	145	197
Argila		417	449	507
Classe textural		Argilosa	Argilosa	Argilosa

P = fósforo, K = potássio, Ca = cálcio, Mg = magnésio, Al = alumínio, CTC<sub>7</sub> = capacidade de troca de cátions em pH 7, CO = carbono orgânico, MOS = matéria orgânica do solo, V = saturação por bases, m = saturação por alumínio, Ds = densidade do solo, Dp = densidade de partículas. CXbe: Cambissolo Háplico; PVd: Argissolo Vermelho; e LVe: Latossolo Vermelho.

## 2.2 Amostragem do solo e preparação das amostras

Foram coletadas 25 amostras indeformadas para cada classe de solo na camada de 0-10 cm, sendo 5 dessas amostras para testes iniciais necessários para a construção da curva de salinidade artificial do solo utilizando doses crescentes de solução de NaCl 1 mol L<sup>-1</sup>. Para a coleta foi utilizado o amostrador de Uhland e cilindros de plástico rígido com 10cm de diâmetro e 5cm de altura, totalizando 75 amostras.

Os tratamentos consistiram em alcançar 4 níveis de condutividade elétrica ( $\sigma$ ) no extrato de saturação de cada solo, sendo esses valores de 10, 15, 25 e 50 dSm<sup>-1</sup>, com 4 repetições para cada tratamento. Para o tratamento controle, que representa os solos na sua condição natural, não foi adicionado nenhum conteúdo de NaCl nas amostras de solos.

No laboratório, as amostras foram preparadas para a remoção do excesso de solo dos cilindros e as amostras foram saturadas por capilaridade com soluções que continham 55, 110, 275 e 550 g de NaCl L<sup>-1</sup> de água destilada.

## 2.3 Descrição da calibração em laboratório

Depois de saturadas, ao longo do secamento das amostras foram feitas leituras de resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ,  $\Omega.m$ ), com o resistivímetro modelo X5xtal 250 (Auto Energia, Minas Gerais, Brasil), de condutividade elétrica ( $\sigma$ , dS m<sup>-1</sup>), de temperatura (T, °C) e do conteúdo de água do solo ( $\theta$ , m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>) com o sensor de capacitância TEROS 12 (Meter Group, Inc., Pullman, WA, EUA). Simultaneamente, as amostras também foram pesadas para o cálculo de  $\theta$  pelo método padrão da estufa-termogravimétrico. Após essas medições, a secagem das amostras foi acelerada em estufa a 60°C por duas horas; quando as amostras não apresentaram perdas de água significativas (menor que 2g em 24 horas) elas foram colocadas na estufa por 48 horas à 105-110°C para obtenção da massa de solo seco. Esse procedimento foi recentemente utilizado com sucesso por Melo et al. (2021), contudo, aqui foi incluído a variável  $\sigma$ .

A medição de  $\rho$  foi realizada pela injeção de correntes elétricas no solo por meio de dois eletrodos, A e B, e por meio das diferenças de potencial entre outros dois eletrodos, M e N (Samouëlian et al., 2005). As leituras de  $\rho$  foram realizadas com auxílio de dois multímetros. O trabalho foi conduzido em arranjo Wenner (Samouëlian et al., 2005), unidimensional, com quatro eletrodos dispostos na ordem A M N B espaçados 0.019m entre si (Melo et al., 2021), e inseridos a uma profundidade de cerca de 0.015m. A  $\rho$  foi calculada por meio da equação 1, que relaciona a corrente elétrica (I), a diferença de potencial elétrico ( $\Delta V$ ) e o fator de forma devido ao arranjo e espaçamento entre eletrodos utilizado.

$$\rho = \frac{4\pi a}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

onde  $\rho$ : resistividade elétrica do solo ( $\Omega.m$ ); a: espaçamento entre os eletrodos (m); b: profundidade dos eletrodos (m);  $\Delta V$ : diferença de potencial devido à aplicação da corrente elétrica (mV); I: corrente elétrica injetada (mA).

Adicionalmente, foi determinada a densidade do solo ( $D_s$ ) e a porosidade total ( $P_t$ ) a partir do  $\theta$  na saturação, em cada amostra, pelo método do cilindro volumétrico (Dane & Topp, 2002). Ainda, para cada amostra, utilizando solo peneirado (<2 mm) e seco ao ar foram determinados a distribuição de partículas por tamanho e atributos químicos, pH (KCl), pH (H<sub>2</sub>O), conteúdos de K, P, Na, Ca, Mg, Al, soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (t), capacidade de troca de cátions a pH 7 (T), saturação por bases (V), saturação por Al (m), conteúdo de matéria orgânica (MOS), P remanescente (P-Rem) e a condutividade elétrica

avaliada com eletrodo de condutividade em laboratório ( $\sigma$  lab), conforme métodos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Teixeira et al., 2017).

## 2.4 Análises estatísticas

Os dados de  $\theta$  obtidos pelo método padrão e  $\rho$  foram ajustados a diferentes modelos (potencial, polinomial, exponencial, logarítmico e linear), sendo que valores negativos de  $\rho$  foram desconsiderados e os *outliers* foram removidos do conjunto de dados. Os modelos foram avaliados quanto à exatidão pelo índice de determinação ( $R^2$ ) e raiz do erro médio quadrático (RMSE), verificando a acurácia entre os valores observados e os valores preditos pelo modelo. O RMSE foi calculado por meio da seguinte fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum x}{n}\right)}$$

Onde:  $x$  = diferença entre os valores estimados pela equação e os valores do conteúdo de água calculados pelo método padrão, essa diferença foi chamada de erro;  $n$  = número total de dados.

Menores valores de RMSE são desejados porque indicam melhor ajuste dos modelos. O índice Critério de Informação de Akaike (AIC) foi calculado para determinar, juntamente com os outros parâmetros, qual o modelo que melhor ajusta a relação  $\theta$ - $\rho$ , sendo que menores valores de AIC determinam modelos com maior qualidade. Para que um modelo seja considerado melhor do que outro, o AIC deve ser menor em pelo menos 2 unidades (Melo et al., 2021).

A correlação linear de Pearson ( $p < 0.05$ ) foi usada para quantificar a intensidade das relações entre  $\rho$  e os atributos químicos e físicos do solo. O Teste t foi aplicado para avaliação da significância dos dois parâmetros estimados e os intervalos de confiança foram calculados para os parâmetros dos modelos obtidos.

O algoritmo Random Forest (Breiman, 2001) foi empregado para elucidar quais as variáveis apresentam maior sensibilidade à  $\rho$  e a  $\sigma$ , a  $\sigma$  foi utilizada porque além de ser o método padrão para indicar o conteúdo de solutos no solo, é relacionada com a  $\rho$  de forma inversa. Assim, o RFA foi gerado utilizando o pacote random forest (Liaw and Wiener, 2002) no software R, versão 4.0.2 de 2020. Usando o random forest para analisar quais variáveis eram mais sensíveis à  $\rho$  e à  $\sigma$ , foram definidos quatro parâmetros, sendo esses: *ntree* (número de árvores na floresta), *nodesize* (número mínimo de dados em cada nó terminal), *maxnodes* (número máximo de nós terminais que as árvores da floresta podem ter) e *mtry* (número de variáveis usadas em cada árvore) (Liaw and Wiener, 2002). Assim, foram definidos *ntree* = 300, porque a variação do erro se tornou constante com 300 árvores, *nodesize* = 10 para cada nó terminal, *maxnodes* = 10 e *mtry* foi arredondado para 10 porque a quantidade de preditores foi de 27, usando modelo de regressão. O total de variáveis envolvidas no processo de tomada de decisão foram 27, mas apenas as 10 variáveis mais sensíveis foram selecionadas para os gráficos. Para prever a  $\rho$  e a  $\sigma$  todas as 27 variáveis foram envolvidas e a acurácia dos modelos do random forest foi avaliada por meio do  $R^2$  e RMSE.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1 Modelagem da relação entre $\theta$ - $\rho$ em três solos diferentes

Os indicadores de acurácia e qualidade do ajuste para 5 diferentes modelos de regressão entre  $\theta$  e a  $\rho$  estão apresentados na Tabela 2. De forma geral, o modelo potencial, também chamado de Lei de Archie apresentou melhor desempenho cujos ajustes entre  $\theta$  e  $\rho$  podem ser observados nas Figs. 1A, 1B, 1C e 1D para o tratamento controle de cada um dos três tipos de



solos, CXbe ( $R^2 = 0,85$ ,  $RMSE = 0,062 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ,  $AIC = -94,94$ ), PVd ( $R^2 = 0,86$ ,  $RMSE = 0,064 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ,  $AIC = -81,40$ ) e LVe ( $R^2 = 0,75$ ,  $RMSE = 0,054 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ ,  $AIC = -70,54$ ), respectivamente. Esse resultado difere da revisão realizada por Calamita et al. (2012), a qual relata que o modelo potencial apresentou adequado desempenho em solos argilosos. Contudo, Aranda et al. (2021) em um estudo em área de aterro sanitário e Melo et al. (2021) em um estudo com diferentes graus de compactação no solo, também encontraram que a Lei de Archie foi adequada para estimar  $\theta$ . Ambos os estudos foram realizados em solos sob clima tropical, portanto em solos mais intemperizados que os considerados por Calamita et al. (2012).

Na condição natural, os solos apresentaram diferentes valores de  $\rho$  para uma mesma condição de  $\theta$ , sendo que o PVd apresentou menores valores de  $\rho$  seguido pelo CXbe e o LVe (Fig. 1A). Observou-se que para todos os solos a faixa de  $\rho$  variou de 500 a mais de 10000  $\Omega\cdot\text{m}$ . Ao comparar solos de clima tropical e clima temperado, nota-se que solos de clima temperado apresentam menor  $\rho$  do que solos de clima tropical. Em um solo de textura franco arenosa, Calamita et al. (2012) obteve valores de  $\rho$  menores que 10 até 1000  $\Omega\cdot\text{m}$ . Jayawickreme et al. (2014), em um solo de textura média-argilosa para areia fina em uma área de floresta temperada encontrou valores de  $\rho$  numa faixa de 50-330  $\Omega\cdot\text{m}$ . Hadzick et al. (2011) encontrou  $\rho$  entre 100-1000  $\Omega\cdot\text{m}$  em um solo de textura arenosa em um Typic Hapludult. Em solos de clima tropical, esses valores podem ser maiores que 8000  $\Omega\cdot\text{m}$  em solos em condição natural, isto é, sem adição significativa de solutos por intervenção antrópica. Paglis (2016) em uma área experimental de cultura de café encontrou valores de  $\rho$  variando entre 120-1400  $\Omega\cdot\text{m}$ . Nascimento et al. (2008), em um Rhodic Hapludox de textura franco-argilo-arenosa, encontrou valores médios de  $\rho$  entre 2000-8000  $\Omega\cdot\text{m}$ , enquanto em área de Cerrado com adição de fertilizante, esses valores médios chegaram a 42000  $\Omega\cdot\text{m}$ . Melo et al. (2021) em uma área de café com solo do tipo Typic Hapludox e com estrutura preservada encontrou valores de  $\rho$  menores que 10  $\Omega\cdot\text{m}$  até 8000  $\Omega\cdot\text{m}$ .

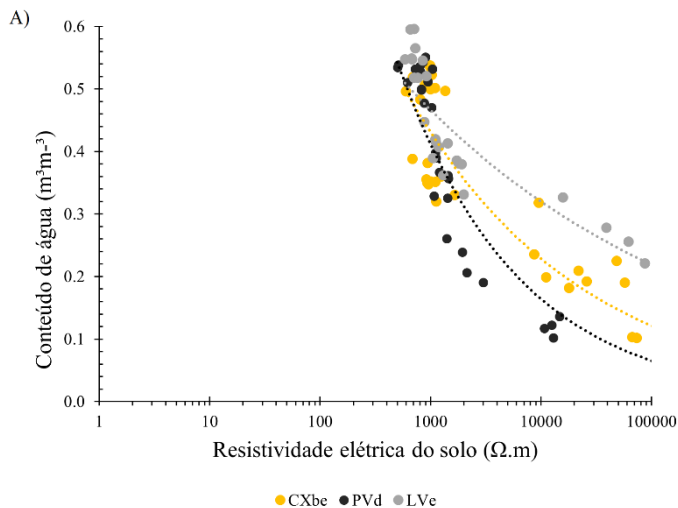
A  $\rho$  medida em solo seco ocasionou valores extremamente altos de resistividade, que podem ser considerados erros de leitura, assim como os reportados por Jeřábek et al., (2017). Esses erros podem ser ocasionados pelo contato pobre entre eletrodo-solo (Samouëlian et al. 2005) e pela ausência da passagem de corrente elétrica no solo (Molin & Rabello, 2011). Apesar de  $\theta$  estimada com a  $\rho$  em solo seco tender a apresentar menos problemas do que sensores FDR e TDR (Calamita et al., 2012), ainda assim  $\theta$  não deve ser estimada em condições de solo muito seco (Jeřábek et al., 2017).

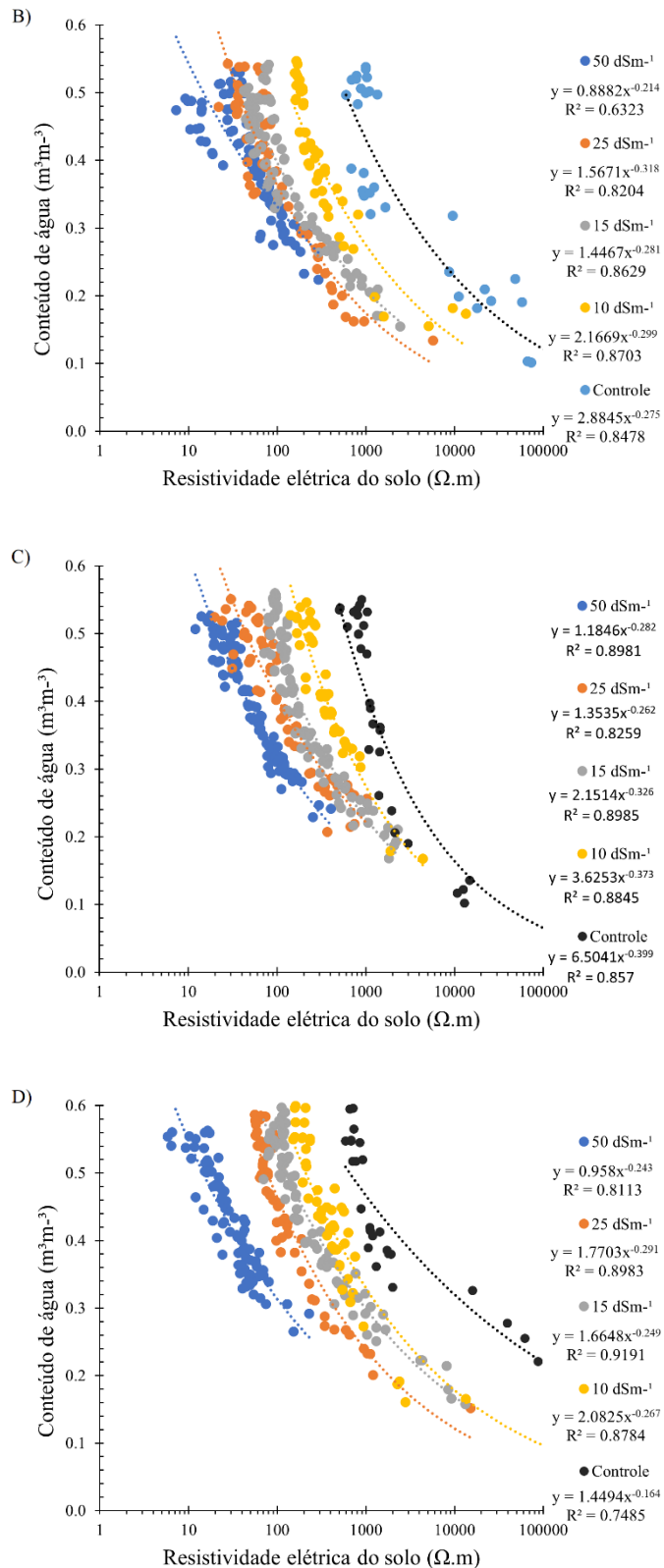
Ao analisar o efeito do aumento da concentração de solutos com relação ao tipo de modelo de regressão ajustado, observou-se que para concentrações de solutos até  $15 \text{ dSm}^{-1}$ , o modelo potencial seguido do logarítmico apresentaram maior acurácia nos três tipos de solos, de acordo com os indicadores  $R^2$ ,  $RMSE$  e  $AIC$  (Tabela 2). No entanto, com a concentração de solutos acima de  $25 \text{ dS m}^{-1}$ , os modelos polinomial de segunda ordem e logarítmico apresentaram melhor ajuste entre  $\theta$  e  $\rho$ . Analogamente, Melo et al. (2021) observaram melhor desempenho para o modelo potencial em Latossolos argilosos, porém, alterando a condição inicial do solo promovendo aumento do grau de compactação, o modelo logarítmico mostrou melhor ajuste. Esses resultados sugerem que solos tropicais argilosos podem ser ajustados à Lei de Archie, o que pode estar relacionado com a qualidade/mineralogia da argila com domínio de caulinita e óxidos e o padrão de cargas elétricas de superfície por elas gerado.

Os três tipos de solos apresentaram o mesmo padrão para o efeito da concentração de solutos sobre a relação  $\theta$ - $\rho$ , sendo que para um mesmo valor de  $\theta$ , quanto maior é a concentração de solutos menor é  $\rho$ . Helene et al. (2020) também encontraram essa relação em

uma área de aterro sanitário, onde os valores de  $\rho$  foram inversamente proporcionais ao conteúdo de sais no solo, e os menores valores de  $\rho$  indicaram áreas com maior contaminação. É possível observar que é mais fácil diferir os tratamentos quando o solo está mais próximo da saturação, com  $\theta > 0,4 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (Figs. 1B, 1C e 1D). Na condição de  $\theta$  no solo mais seco, ainda é possível diferenciar a concentração de solutos da condição natural do solo, no entanto, com o aumento da concentração de solutos os valores de  $\rho$  alteram-se menos, sobretudo para o PVd. Isso acontece porque quando o solo está saturado, o  $\theta$  deixa de influenciar fortemente nas variações da  $\rho$  e sim apenas a concentração de solutos, tendo assim uma condição padronizada. Porém, à medida que o solo seca, a água passa a interferir nas variações de  $\rho$  e isso dificulta a separação dos tratamentos quanto à concentração de solutos.

Também pode ser percebido por meio da relação  $\theta$ - $\rho$  para os níveis crescentes de concentração de solutos (Figs. 1B, 1C, 1D), que para a concentração de  $10 \text{ dSm}^{-1}$  o CXbe apresentou menor  $\rho$  para um mesmo  $\theta$  quando comparado com o PVd e o LVe, e não houve grande diferença entre o LVe e o PVd na relação  $\theta$ - $\rho$ . Quando a concentração de solutos estava em  $25 \text{ dSm}^{-1}$ , o CXbe apresentou menor  $\rho$  para um mesmo  $\theta$ , seguido do PVd e LVe. Já para a maior concentração de solutos avaliada,  $50 \text{ dSm}^{-1}$ , o LVe apresentou menor  $\rho$  para um mesmo  $\theta$  se comparado com os demais solos, sendo que o CXbe e o PVd não se diferenciaram nessa condição. Observa-se também que o tratamento que alcançou menor faixa de variação de  $\rho$  foi o de  $50 \text{ dSm}^{-1}$ , que não ultrapassou a  $\rho$  de  $700 \Omega\cdot\text{m}$ , o que dá ideia da magnitude da influência do aumento da concentração de solutos e seu efeito na redução da  $\rho$ , impactando medições estimadas de  $\theta$  com a TRE. No monitoramento de umidade do solo, o objetivo principal é conhecer mudanças no armazenamento de água devido a precipitações pluviométricas ou flutuações do lençol freático no solo, que podem alterar a  $\sigma$  no solo, causando alterações nos valores de  $\rho$ . Portanto, essas relações entre  $\theta$ ,  $\rho$  e  $\sigma$  podem ser identificadas ao longo do tempo no solo por meio da  $\rho$  (Helene et al., 2020).





**Fig. 1.** Relação entre conteúdo de água medido pelo método padrão ( $\theta$ ,  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) e a resistividade elétrica ( $\rho$ ,  $\Omega\cdot\text{m}$ ) para diferentes condutividades elétricas (10, 15, 25 e 50  $\text{dSm}^{-1}$ ) pela adição de NaCl e sem adição de NaCl (controle) em solos com diferentes graus de intemperismo: A) Controle para os três solos, B) CXbe, C) PVD e D) LVe.

**Tabela 2**

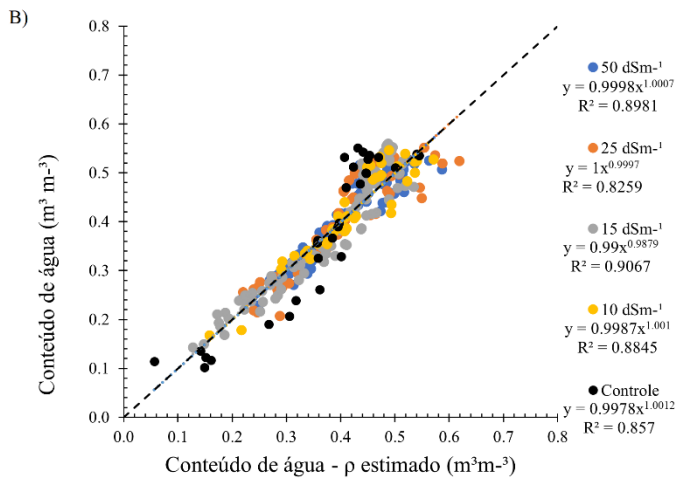
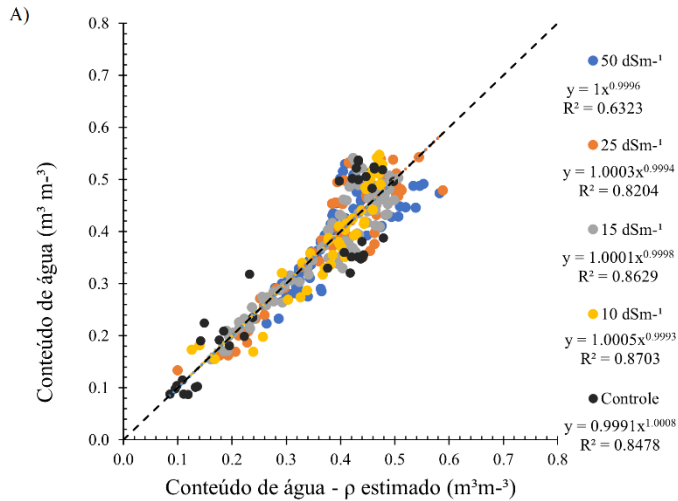
Parâmetros para os modelos potencial, logarítmico, polinomial, exponencial e linear ajustados para relação entre conteúdo de água ( $\theta$ ) e resistividade elétrica ( $\rho$ ) com concentrações de solutos de (10, 15, 25 e 50 dSm<sup>-1</sup>) e sem adição de NaCl (controle).

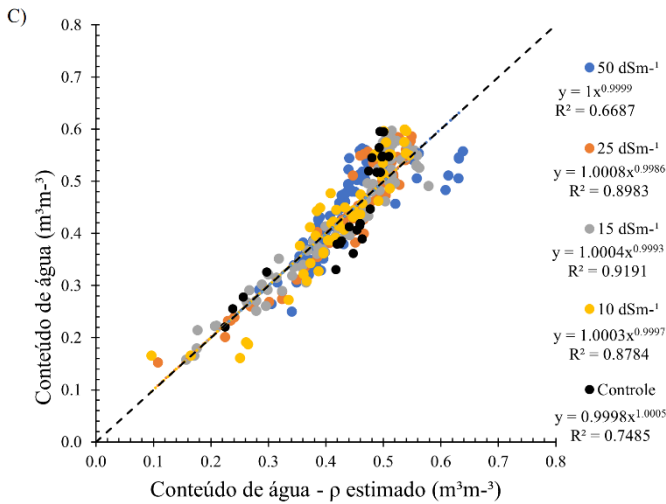
Concentração de solutos	CXbe				PVd				LVe			
	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC
Controle (n = 24, 21, 25)	$\theta=2.8845\rho^{-0.275}$	0.85	0.062	-94.94	$\theta=6.5041\rho^{-0.399}$	0.86	0.064	-81.40	$\theta=1.449\rho^{-0.164}$	0.75	0.054	-70.54
	$\theta=-0.067\ln(\rho)+0.8987$	0.83	0.064	-94.88	$\theta=-0.106\ln(\rho)+1.1665$	0.72	0.083	-58.24	$\theta=-0.062\ln(\rho)+0.8988$	0.69	0.059	-64.62
	$\theta=8^{-12}\rho^2-4^{-6}\rho+0.4064$	0.65	0.100	-64.47	$\theta=2^{-10}\rho^2-3^{-5}\rho+0.4668$	0.64	0.104	-49.20	$\theta=6^{-11}\rho^2-8^{-6}\rho+0.4767$	0.51	0.075	-50.79
	$\theta=0.3509e(-6^{-6}\rho)$	0.61	0.108	-49.18	$\theta=0.3585e(-1^{-5}\rho)$	0.25	0.142	-72.78	$\theta=0.4609e(-1^{-5}\rho)$	0.48	0.077	-71.05
	$\theta=-1^{-6}\rho+0.3773$	0.46	0.120	-49.79	$\theta=-3^{-6}\rho+0.3948$	0.18	0.142	-26.27	$\theta=-3^{-6}\rho+0.4673$	0.45	0.079	-50.18
10 dSm <sup>-1</sup> (n = 41, 45, 41)	$\theta=2.1669\rho^{-0.299}$	0.87	0.041	-170.02	$\theta=3.6253\rho^{-0.373}$	0.88	0.031	-171.21	$\theta=2.0825\rho^{-0.267}$	0.88	0.044	-175.12
	$\theta=-0.093\ln(\rho)+0.9379$	0.76	0.053	-134.49	$\theta=-0.129\ln(\rho)+1.1743$	0.87	0.033	-164.81	$\theta=-0.087\ln(\rho)+0.9614$	0.73	0.060	-130.57
	$\theta=7^{-9}\rho^2-1^{-4}\rho+0.4472$	0.53	0.077	-101.44	$\theta=6^{-8}\rho^2-4^{-4}\rho+0.5507$	0.81	0.056	-148.85	$\theta=3^{-10}\rho^2-4^{-5}\rho+0.4594$	0.40	0.135	-88.49
	$\theta=0.4091e(-9^{-5}\rho)$	0.40	0.084	-139.28	$\theta=0.4738e(-3^{-4}\rho)$	0.65	0.057	-144.15	$\theta=0.418e(-1^{-5}\rho)$	0.18	0.096	-153.52
	$\theta=-3^{-5}\rho+0.4185$	0.34	0.088	-87.80	$\theta=-1^{-4}\rho+0.4663$	0.50	0.064	-108.19	$\theta=-3^{-6}\rho+0.4348$	0.15	0.107	-73.64
15 dSm <sup>-1</sup> (n = 91, 75, 104)	$\theta=1.4467\rho^{-0.281}$	0.86	0.038	-333.82	$\theta=2.1514\rho^{-0.326}$	0.90	0.035	-410.33	$\theta=1.6648\rho^{-0.249}$	0.92	0.035	-310.34
	$\theta=-0.091\ln(\rho)+0.8287$	0.86	0.039	-331.22	$\theta=-0.112\ln(\rho)+0.9902$	0.85	0.043	-362.21	$\theta=-0.088\ln(\rho)+0.927$	0.87	0.042	-274.65

	$\theta=1^{-7}\rho^2-4^{-4}\rho+0.4675$	0.77	0.053	-282.57	$\theta=2^{-7}\rho^2-5^{-4}\rho+0.5132$	0.78	0.430	-266.30	$\theta=7^{-9}\rho^2-1^{-4}\rho+0.4878$	0.59	0.078	-177.50
	$\theta=0.4386e(-7^{-4}\rho)$	0.72	0.055	-280.90	$\theta=0.4519e(-5^{-4}\rho)$	0.66	0.067	-285.34	$\theta=0.4552e(-1^{-4}\rho)$	0.51	0.086	-193.11
	$\theta=-2^{-4}\rho+0.4381$	0.61	0.064	-237.79	$\theta=-2^{-4}\rho+0.4518$	0.55	0.118	-217.78	$\theta=-3^{-5}\rho+0.4629$	0.42	0.091	-152.25
	$\theta=1.5671\rho^{-0.318}$	0.82	0.049	-185.31	$\theta=1.3535\rho^{-0.262}$	0.83	0.042	-208.97	$\theta=1.7703\rho^{-0.291}$	0.90	0.038	-240.42
	$\theta=-0.098\ln(\rho)+0.8388$	0.81	0.050	-182.90	$\theta=-0.096\ln(\rho)+0.8591$	0.85	0.039	-217.44	$\theta=-0.102\ln(\rho)+0.946$	0.81	0.050	-196.70
25 dSm <sup>-1</sup> (n = 53, 64, 61)	$\theta=9^{-8}\rho^2-6^{-4}\rho+0.4782$	0.76	0.060	-164.64	$\theta=8^{-7}\rho^2-1^{-3}\rho+0.5287$	0.85	0.039	-215.02	$\theta=2^{-8}\rho^2-4^{-4}\rho+0.5192$	0.68	0.153	-161.12
	$\theta=0.3979e(-3^{-4}\rho)$	0.38	0.097	-181.01	$\theta=0.4781e(-1^{-3}\rho)$	0.74	0.053	-189.30	$\theta=0.4471e(-9^{-5}\rho)$	0.25	0.101	-175.24
	$\theta=-8^{-5}\rho+0.4124$	0.23	0.102	-97.68	$\theta=-4^{-4}\rho+0.4762$	0.66	0.059	-166.64	$\theta=-3^{-5}\rho+0.4599$	0.18	0.103	-103.59
	$\theta=0.8882\rho^{-0.214}$	0.78	0.049	-274.14	$\theta=1.1846\rho^{-0.282}$	0.92	0.026	-469.49	$\theta=0.7786\rho^{-0.186}$	0.67	0.047	-317.33
	$\theta=-0.08\ln(\rho)+0.7057$	0.70	0.044	-286.57	$\theta=-0.107\ln(\rho)+0.8208$	0.90	0.025	-475.82	$\theta=-0.078\ln(\rho)+0.6879$	0.72	0.042	-333.27
50 dSm <sup>-1</sup> (n = 86, 97, 106)	$\theta=5^{-6}\rho^2-0.0024\rho+0.5152$	0.75	0.037	-313.63	$\theta=5^{-6}\rho^2-0.0026\rho+0.5345$	0.88	0.027	-454.03	$\theta=2^{-5}\rho^2-0.0045\rho+0.5585$	0.81	0.046	-369.17
	$\theta=0.4865e(-3^{-3}\rho)$	0.69	0.042	-306.54	$\theta=0.4814e(-3^{-3}\rho)$	0.72	0.040	-408.02	$\theta=0.5056e(-5^{-3}\rho)$	0.70	0.046	-335.85
	$\theta=-0.0013\rho+0.4783$	0.70	0.044	-288.61	$\theta=-0.0011\rho+0.4757$	0.65	0.048	-337.98	$\theta=-0.0019\rho+0.503$	0.58	0.052	-291.39

n: quantidade de dados usados para fazer a modelagem (CXbe, PVd, e LVe, respectivamente); R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do modelo; RMSE: raiz do erro médio quadrático; AIC: Critério de Informação de Akaike.

De modo geral, o  $\theta$  medido pelo método padrão e o  $\theta$  estimado por meio da  $\rho$  após a calibração com modelo potencial possuem uma relação que segue a reta 1:1 independente da concentração de solutos no solo (Fig. 2A, 2B e 2C). Esse resultado mostra que com o processo de calibração, o  $\theta$  pode ser estimado por meio da TRE para diferentes solos tropicais. O PVd apresentou maiores valores de  $R^2$  em todas as concentrações de solutos aplicadas, enquanto o CXbe e o LVe apresentaram menor  $R^2$  quando a concentração de solutos foi  $\geq$  que  $50 \text{ dSm}^{-1}$ . No entanto, todos os solos apresentaram  $R^2 > 0.6$ .

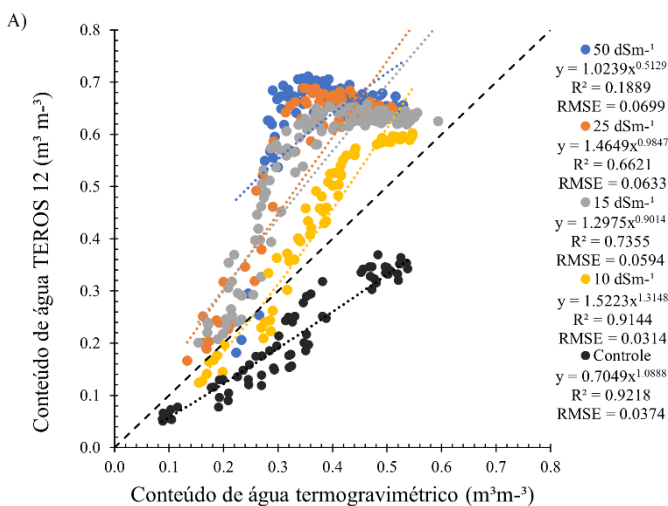


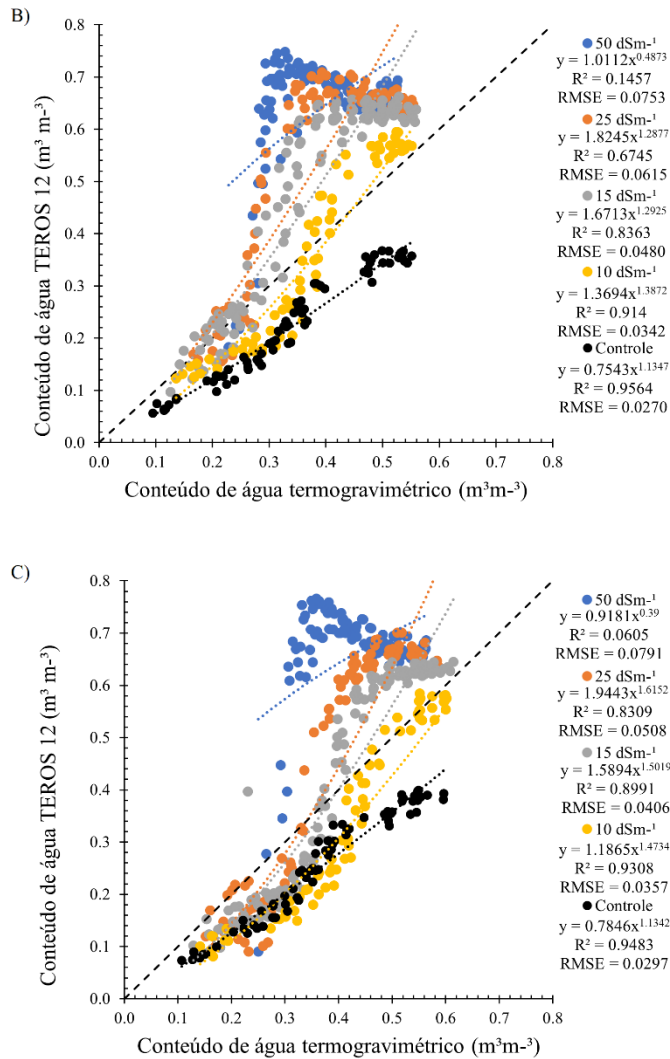


**Fig. 2.** Relação entre  $\theta$  pelo método padrão e  $\theta$  estimado pelo método da tomografia de resistividade elétrica para diferentes condutividades elétricas (10, 15, 25 e 50 dSm<sup>-1</sup>) devido a adição de NaCl e sem adição (controle) em solos com diferentes graus de intemperismo: A) CXbe, B) PVD e C) LVe.

### 3.2 Efeito da concentração de solutos na relação $\theta$ - $\sigma$

A relação entre o  $\theta$  obtido pelo método padrão e o  $\theta$  diretamente obtido pelo sensor TEROS 12 foi ajustada a partir do modelo potencial (Figs. 3A, 3B e 3C). Em geral, o modelo potencial se destacou por sua acurácia mais alta, a qual foi maior para condição de menor  $\sigma$ , até 10 dSm<sup>-1</sup>, com  $R^2 > 0.9$  e  $RMSE \leq 0.03$  m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>. Quanto maior  $\sigma$ , o  $R^2$  diminui e o RMSE aumenta, sendo que solos em que foi testado 50 dSm<sup>-1</sup> possuem  $R^2 < 0.2$  e  $RMSE \geq 0.07$  m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup> (Figs. 3A, 3B e 3C).





**Fig. 3.** Relação entre  $\theta$  pelo método padrão ( $m^3m^{-3}$ ) e  $\theta$  obtido pelo sensor TERS 12 ( $m^3m^{-3}$ ) para diferentes  $\sigma$  (10, 15, 25 e 50  $dSm^{-1}$ ) e sem adição de NaCl (controle) em solos com diferentes graus de intemperismo: A) CXbe, B) PVd, e C) LVe.

Segundo a Figura 3, o solo na sua condição natural tem uma distribuição que segue a reta do modelo potencial, assim, o modelo apresentou  $R^2 > 0,9$ . Em contrapartida, os valores de  $\theta$  são subestimados pelo sensor quando o solo se encontra em condição natural. Assim, quanto maior é  $\sigma$  no solo, maior é a superestimação do  $\theta$  pelo sensor. O LVe e o PVd apresentaram valores superestimados de  $\theta$  em toda a reta 1:1 para  $\sigma$  de 50  $dSm^{-1}$ . Isso acontece porque os sensores eletromagnéticos calculam  $\theta$  por meio da constante dielétrica, que é altamente influenciada por  $\sigma$ , afetando  $\theta$  encontrado pelo sensor (Sevostianova et al., 2015). Por outro lado, a acurácia de  $\theta$  em função de  $\sigma$  tem variado bastante entre os estudos (Hamed et al., 2006; Thompson et al., 2007; Sevostianova et al., 2015), em função dos níveis de salinidade, tipos de sensores e tipos de solos.

No CXbe, para  $\sigma$  de 15, 25 e 50  $dSm^{-1}$  o sensor superestimou  $\theta$ . No PVd, para  $\sigma$  de 15  $dSm^{-1}$  o sensor subestimou o  $\theta$  quando esse é menor que 0,28  $m^3m^{-3}$  pelo método padrão e superestimou quando é maior que 0,28  $m^3m^{-3}$ . No LVe, para  $\sigma$  de 15  $dSm^{-1}$  o sensor subestimou o  $\theta$  quando esse é menor que 0,39  $m^3m^{-3}$  e superestimou o  $\theta$  quando esse é maior



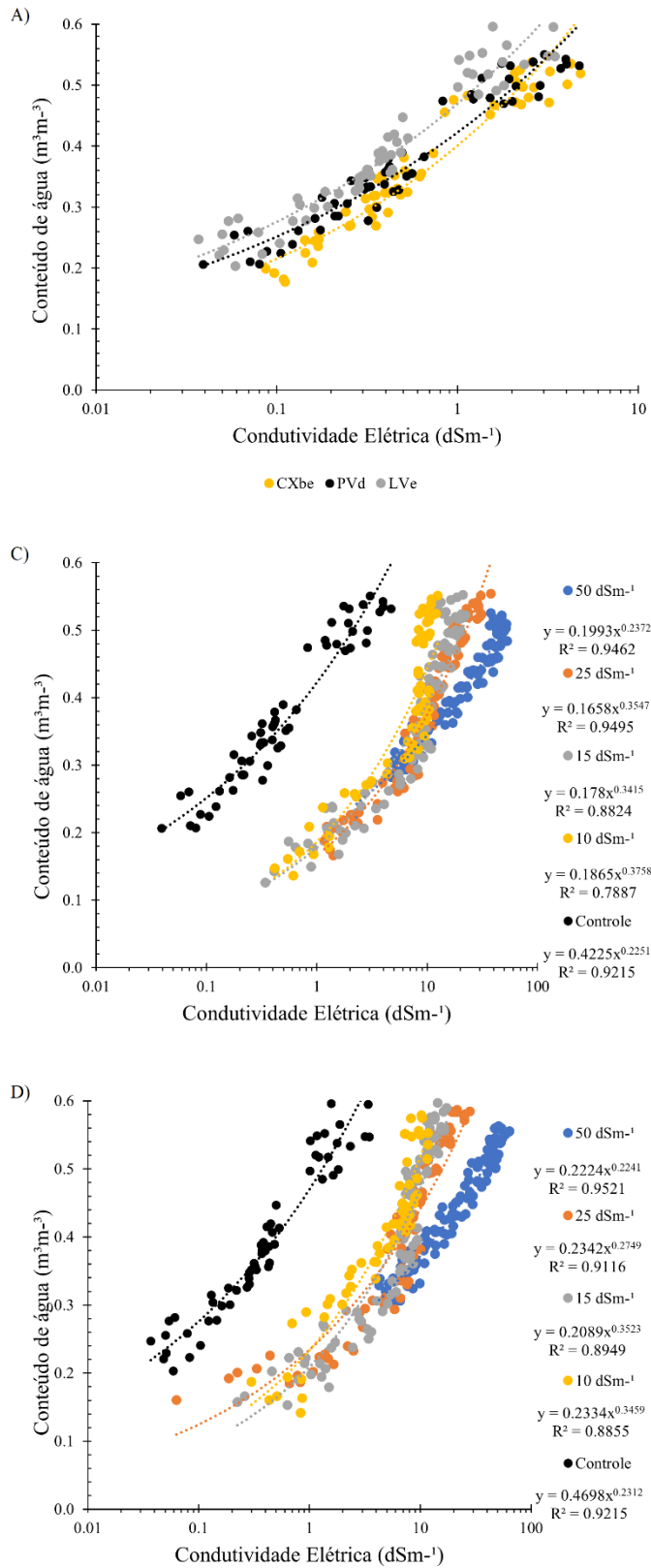
que  $0,39 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Para o tratamento de  $25 \text{ dSm}^{-1}$ , o sensor subestimou o  $\theta$  quando esse está abaixo de  $0,34 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  e superestimou o  $\theta$  quando esse está acima de  $0,35 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ .

Para  $\sigma$  de  $10 \text{ dSm}^{-1}$ , quando os solos apresentaram menor  $\theta$  pelo método padrão, o sensor passou a subestimar o  $\theta$  do solo. No CXbe, quando o solo está acima de  $0,30 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  o sensor passou a superestimar o  $\theta$ , no LVe o sensor passou a superestimar acima de  $0,48 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  e no PVd acima de  $0,40 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Para o tratamento de  $25 \text{ dSm}^{-1}$ , em geral, o  $\theta$  foi superestimado, mas abaixo de  $0,28 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  pôde ser super ou subestimado.

Comparando os modelos para a relação  $\theta$ - $\sigma$  (Tabela 3 – anexo), o modelo potencial apresentou melhor ajuste no geral, com  $R^2 > 0,7$ ,  $\text{RMSE} < 0,054$ . e AIC entre  $-190,90$  e  $-588,79$  para todas as concentrações de solutos dos três solos Figs. 4A, 4B, 4C e 4D para o controle dos três solos, CXbe, PVd e LVe, respectivamente. Em relação aos tratamentos controle, observou-se que para um mesmo  $\theta$  o LVe apresentou menor  $\sigma$  do que o PVd e o CXbe, respectivamente. O LVe apesar de possuir maior quantidade de argila ( $506 \text{ g kg}^{-1}$ , Tabela 1), têm menor MOS e CTC ( $19 \text{ g kg}^{-1}$  e  $6,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  respectivamente, Tabela 1), contribuindo para a menor reatividade e conseqüente menor troca iônica deste solo, o que pode explicar a menor  $\sigma$ . Para  $\rho$  o oposto foi observado, como esperado pela relação inversa entre  $\sigma$  e  $\rho$ , com LVe apresentando maior  $\rho$  para um mesmo  $\theta$ , contudo a diferenciação para os demais solos foi maior (Fig. 1A), o que pode sugerir maior sensibilidade da  $\rho$  ao efeitos dos tipos de solo.

Já o CXbe mostrou maior  $\sigma$  para um mesmo  $\theta$ . Esse solo possui maior quantidade de areia ( $419 \text{ g kg}^{-1}$ ), menor quantidade de argila ( $417 \text{ g kg}^{-1}$ ) e CTC semelhante ao PVd, apesar de menor MOS (Tabela 1), além de um teor superior de Na ( $163,50 \text{ mg dm}^{-3}$ , Tabela 1). Solos pouco intemperizados tendem a apresentar maiores teores de Na do que solos mais intemperizados, isso porque o Na é facilmente lixiviado com os processos do intemperismo (Ibraimo et al., 2004). Nesse sentido, o CXbe apresentou maior reatividade.

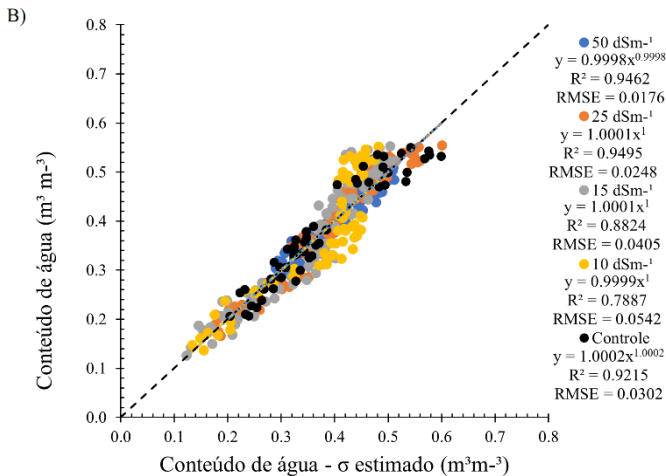
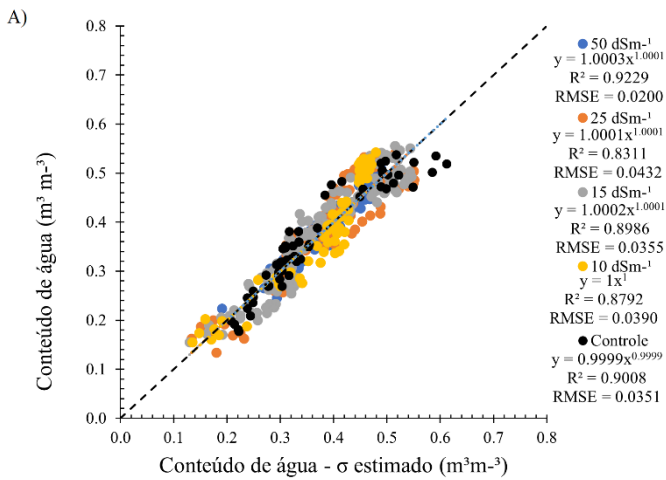
Quando os solos CXbe, PVd e LVe se encontraram com  $\theta$  acima de  $0,5 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  (Fig. 4A, 4B, 4C e 4D) foi possível diferenciar os tratamentos de acordo com a sua  $\sigma$ . Da mesma forma que acontece com a  $\rho$ , quando o solo está com menor  $\theta$ , a  $\sigma$  passa a ter valores mais próximos, não sendo possível diferenciar as concentrações de solutos, principalmente as  $\sigma$  de  $10$ ,  $15$  e  $25 \text{ dSm}^{-1}$ . O solo na sua condição natural não apresentou grandes quantidades de solutos, por isso se diferiu dos demais tratamentos (Figs. 4B, 4C e 4D). Já o tratamento de  $50 \text{ dSm}^{-1}$  se diferencia pela sua grande quantidade de solutos, o que é nítido para condições de  $\theta$  acima de  $0,4 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Comparando com a  $\rho$ , os tratamentos foram diferenciados por meio da  $\rho$  quando o  $\theta$  estava em  $0,4 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  e usando a  $\sigma$ , os tratamentos foram diferenciados quando o  $\theta$  no solo está acima de  $0,5 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ . Assim, os valores de  $\rho$  proporcionaram maior distinção do conteúdo de solutos presentes no solo se comparado com a  $\sigma$ .

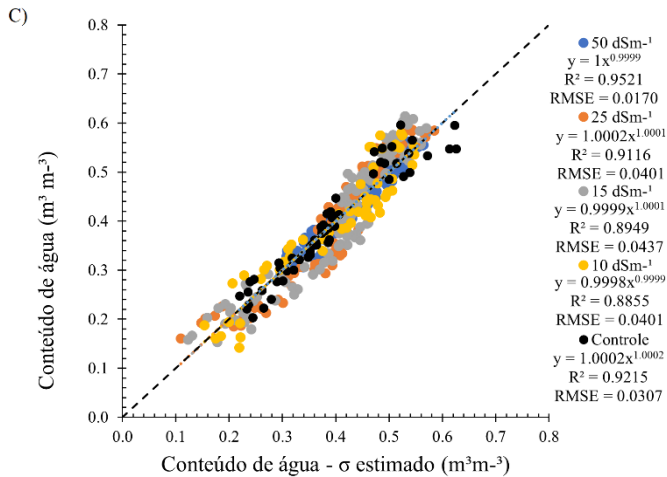


**Fig. 4.** Relação entre conteúdo de água ( $\theta$ ,  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ,  $\text{dSm}^{-1}$ ) para diferentes  $\sigma$  (10, 15, 25 e 50  $\text{dSm}^{-1}$ ) pela adição de NaCl e sem adição de NaCl (controle) em solos com diferentes graus de intemperismo: A) Controle dos três solos, B) CXbe, C) PVd e D) LVe.

Os dados de  $\theta$  medido pelo método padrão e  $\theta$  estimado por meio da  $\sigma$  utilizando modelo potencial para calibração possuem uma relação que segue a reta 1:1, independente da concentração de solutos no solo (Fig. 5A, 5B e 5C), assim como aconteceu para a  $\rho$ . Esse ajuste possibilita a estimativa do  $\theta$  por meio da  $\sigma$ .

De modo geral, a validação do  $\theta$  medido pelo método padrão comparado com o  $\theta$  estimado por meio do  $\sigma$  (Fig. 5A, 5B e 5C) mostrou valores de  $R^2$  superiores aos de  $\theta$  estimado por meio da  $\rho$  (Fig. 2), ambos pelo modelo potencial, sendo que para todos os solos foi obtido  $R^2 > 0,7$  quando o  $\theta$  foi estimado por meio do  $\sigma$ . Em algumas concentrações de solutos o  $\theta$  estimado pela  $\rho$  apresentou maior  $R^2$  do que o  $\theta$  estimado pelo  $\sigma$ , sendo no PVD para as concentrações de solutos de 10 e 15  $\text{dSm}^{-1}$  e no LVe para a concentração de soluto de 15  $\text{dSm}^{-1}$ . No CXbe este padrão foi encontrado para todas as concentrações de solutos.





**Fig. 5.** relação entre o conteúdo de água ( $\theta$ ) obtido pelo método padrão e  $\theta$  estimado por meio da  $\sigma$  (m<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>) utilizando o sensor TERS 12 após calibração com modelo potencial, em diferentes condutividades elétricas (10, 15, 25 e 50 dSm<sup>-1</sup>) pela adição de NaCl e sem adição de NaCl (controle) em solos com diferentes graus de intemperismo: A) CXbe, B) PVd e C) LVe.

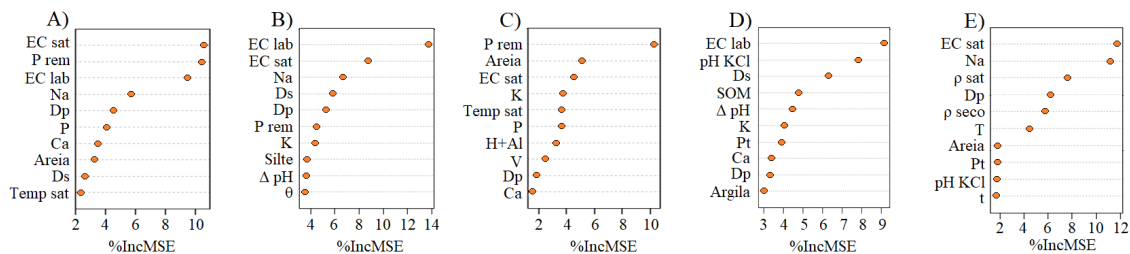
### 3.3 Relação entre $\theta$ , $\rho$ , $\sigma$ e atributos físicos e químicos do solo

As variáveis que se correlacionaram negativamente com a  $\rho$  são principalmente aquelas relacionadas com a concentração de solutos no solo, sendo essas a  $\sigma_{dry}$  (condutividade elétrica em solo seco),  $\sigma_{lab}$  (condutividade elétrica calculada pelo método padrão de laboratório) e Na (Fig. 6). Logo, a  $\rho$  foi capaz de identificar a variação da concentração de solutos no solo proporcionada pelos tratamentos, o que indica a sua eficácia como ferramenta para a identificação de padrões de salinidade no solo. Nosetto et al. (2013), em um estudo com um Entic Haplustolls na Argentina, localizado em uma área de pastagem nativa e com textura arenosa, também encontraram padrões de salinidade no solo de acordo com a topografia e o manejo por meio da  $\rho$ , concluindo que a TRE é uma boa ferramenta para indicar a salinidade na zona saturada do solo. Salienta-se a correlação entre  $\rho$  e  $\sigma_{lab}$ , como base para afirmar a coerência da  $\rho$  em relação com método padrão de laboratório para inferir propriedades elétricas no solo, o que é importante para levantamentos de campo a partir da  $\rho$ .



correlação entre esses dois aconteceu porque não houve grandes variações de temperatura durante o experimento. Vale lembrar que a correlação de Pearson relaciona de modo linear duas variáveis, assim, outras relações não lineares podem acontecer entre  $\rho$  e outras variáveis, e essas relações não lineares não se mostram significativas com a correlação de Pearson.

As propriedades do solo mais sensíveis à  $\rho$  variaram em relação ao  $\theta$  presente no solo (Figs. 7A e 7B). Porém, para todos os tratamentos, tanto no solo saturado como no solo seco as variáveis relacionadas com a concentração de solutos ( $\sigma$  lab,  $\sigma$  sat e Na) foram as mais sensíveis à  $\rho$ , o que reflete o aumento da concentração de solutos decorrente dos tratamentos, e por isso, se sobrepôs às demais variáveis. Portanto, quando o solo se encontra com alta concentração de solutos, essa variável passa a influenciar mais a  $\rho$  do que o  $\theta$ . Ainda, o Na se correlacionou mais fortemente com o  $\rho$  sat (-0,6) do que com o  $\rho$  dry (-0,4) devido a influência do  $\theta$ , sendo que no solo saturado o  $\theta$  não apresentou grande influência na  $\rho$  por ser uma condição padronizada. No entanto, quando o solo começa a secar, o  $\theta$  passa a ter mais influência na  $\rho$ , fazendo com que o Na tenha menor correlação. Por isso, é mais fácil diferir os tratamentos por meio da  $\rho$  quando o solo está com  $\theta > 0,4 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ .



**Fig. 7.** Ranqueamentos de sensibilidade obtidos por meio do algoritmo de Random Forest das variáveis físicas e químicas do solo em relação: A) à resistividade elétrica avaliada em solo saturado ( $\rho$  sat); B) à resistividade elétrica avaliada em solo seco ( $\rho$  dry); C) à resistividade elétrica avaliada em solo saturado ( $\rho$  sat) em condição natural, isto é, sem adição de NaCl; D) à resistividade elétrica avaliada em solo seco ( $\rho$  dry) em condição natural, isto é, sem adição de NaCl E) à condutividade elétrica ( $\sigma$ ) avaliada pelo método padrão de laboratório (EC lab). EC lab:  $\sigma$  obtida em laboratório com condutímetro e eletrodo; EC dry:  $\sigma$  medida em solo seco; EC sat  $\sigma$  medida em solo úmido;  $\rho$  sat:  $\rho$  em solo saturado;  $\rho$  dry:  $\rho$  em solo seco; Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; Pt: porosidade total; P-Rem: fósforo remanescente;  $\Delta$  pH:  $\text{pH H}_2\text{O} - \text{pH KCl}$ ; SOM: matéria orgânica do solo; P: fósforo; Al: alumínio; Na: sódio; Ca: cálcio; K: potássio; V: saturação de bases; T: capacidade de troca de cátions a pH 7; t: capacidade de troca de cátions efetiva; Temp sat: temperatura medida em solo saturado;  $\theta$ : conteúdo de água no solo. %IncMSE: incremento na porcentagem de erro dos modelos do random forest, demonstrando a importância de cada variável na predição de  $\rho$  e EC lab. Foram utilizados dados dos três solos (CX, PV e LV).

Para o solo na sua condição natural (Figs. 7C e 7D), o  $\theta$  não entrou no ranking das dez variáveis mais sensíveis à  $\rho$  do solo saturado, mas foi uma variável importante para a  $\rho$  quando o solo se encontrava mais seco. Nosseto et al. (2013) mediu a salinidade do solo por meio da  $\rho$  na zona saturada do solo, isso porque na saturação temos uma condição padrão do solo, e assim a  $\rho$  começa a ser mais sensível para outras variáveis, por exemplo, para os solutos do solo.

Para o solo saturado de todos os tratamentos, o  $\text{pH H}_2\text{O}$ , temperatura do solo saturado, Dp, areia, silte e V foram as variáveis que mais influenciaram a  $\rho$  (Fig. 7A). A Ds, pH KCl,  $\Delta$  pH, T, Dp e MOS foram as variáveis que mais influenciam a  $\rho$  para o solo seco (Fig. 7B). No controle, o P-Rem foi a variável mais sensível a  $\rho$ , seguido pela areia, que foi a fração textural que mais influenciou  $\rho$ , e as novas variáveis que apresentaram sensibilidade foram P e Ca (Fig. 7C). Essa relação de variáveis mudou para o controle do solo seco, sendo que o pH KCl

foi a variável que mais influenciou a  $\rho$ , e o  $\theta$ , K, Pt e Ca foram as novas variáveis que apareceram sensíveis à  $\rho$  (Fig. 7D).

Apesar de a correlação entre o P-Rem e a  $\rho$  não ser significativa (Fig. 6), por meio da RFA o P-Rem se mostrou uma variável sensível a  $\rho$  com o solo úmido ou seco (Figs. 7A e 7B) quando adicionado sais, e sem adição de soluto, somente para quando o solo quando a  $\rho$  foi medida com o solo saturado (Fig. 7C). Como o P-Rem dá ideia da sorção de  $\text{PO}_4^{3-}$  em cargas positivas do solo, e a presença dessas cargas é mais comum em solos com minerais resultantes de maior intensidade de intemperismo, sugere-se que a  $\rho$  foi sensível às variações mineralógicas dos solos. Quanto a  $\sigma$  lab, o P-Rem não foi ranqueado entre as dez variáveis mais sensíveis pela RFA (Fig. 7E), diferindo de outros estudos, como o de Valente et al. (2014) e o de Medeiros et al., (2018), que encontraram uma forte correlação positiva entre a condutividade elétrica aparente do solo e o P-Rem.

O teor de Na, Dp, e T (CTC) foram as variáveis mais sensíveis em afetar a  $\sigma$  lab (Fig. 7E), contudo, na correlação de Pearson as variáveis que se correlacionaram com  $\sigma$  lab foram o teor de Na, temperatura e silte. Valente et al. (2014) também encontraram fracas correlações entre a  $\sigma$  lab e a MOS e argila, e Machado et al (2015) encontraram uma baixa correlação entre  $\sigma$  e MOS, K e SB. Assim, como esperado o método padrão de laboratório de determinação da  $\sigma$  ( $\sigma$  lab) foi capaz de ter sensibilidade a alteração na concentração de solutos pela adição de Na, além de mostrar alguma sensibilidade a variáveis que permitem inferência quanto à mineralogia (Dp e CTC). Salienta-se a importância preditiva das variáveis  $\sigma$  sat,  $\rho$  sat e  $\rho$  dry (Fig. 7E), o que reforça as ideias já apresentadas da utilização de sensores proximais em campo para medição de propriedades elétricas que podem estimar e monitorar com mais agilidade, de forma não destrutível evitando sucessivas coletas de solo e com menor custo, o armazenamento de água no solo e alterações na concentração de solutos, como aplicação de fertilizantes e presença de contaminantes, em solos tropicais.

A Tabela 3 mostra os valores de  $R^2$  e RMSE que foram obtidos quando tentou-se prever a  $\rho$  em solo seco e saturado e a EC lab por meio das outras variáveis químicas, físicas e biológicas do solo. O  $R^2$  foi alto para a  $\rho$  em solo saturado de todos os tratamentos, assim, pode-se prever a  $\rho$  em solo saturado com acurácia. Para o controle, a  $\rho$  em solo saturado obteve menor valor de  $R^2$  porque a quantidade de dados foi menor para fazer essa predição. O  $R^2$  foi muito baixo e o RMSE foi muito alto para a  $\rho$  em solo seco, tanto para todos os tratamentos como também para o controle. Isso aconteceu porque não é indicado fazer medições de resistividade quando o solo está muito seco já que a incidência de erros de leitura de resistividade são maiores, obtendo-se valores muito extremos, superiores a 100.000  $\Omega.m$ . O EC lab também apresentou um  $R^2$  alto, por isso também pode ser predita com alta acurácia por meio de outras variáveis do solo.



**Tabela 3**

Validação do random forest para prever:  $\rho$  em solo saturado com adição de NaCl,  $\rho$  em solo seco com adição de NaCl,  $\rho$  em solo saturado em condição natural,  $\rho$  em solo seco em condição natural e EC lab.

Acurácia	$\rho$ solo saturado	$\rho$ solo seco	$\rho$ solo saturado controle	$\rho$ solo seco controle	EC lab
R <sup>2</sup>	0,92	0,32	0,55	0,09	0,98
RMSE	126,56	64464,67	643,72	65817,85	3,30

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; RMSE: raiz do erro quadrado médio.

#### 4. Conclusão

Conclui-se que o aumento na concentração de solutos no solo influencia a  $\rho$  em maior grau do que o  $\theta$ . Assim, a  $\rho$  é capaz de identificar diferentes concentrações de solutos no solo. Ainda, em solos salinos pode ocorrer a superestimativa de  $\theta$ , o que pode comprometer o monitoramento de  $\theta$  no solo.

O método mais eficiente em diferenciar a concentração de solutos no solo foi o método da TRE, quando os solos estavam em condição saturada ( $\theta > 0.4\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ), se comparado ao sensor TEROS 12. No entanto, a TRE ainda consegue diferenciar os conteúdos de solutos em condição de solo mais seco, porém os valores de  $\rho$  alteram-se menos.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu Junior, C. H., Muraoka, T., & Lavorante, A. F. (2000). Condutividade elétrica, reação do solo e acidez potencial em solos adubados com composto de lixo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(3), 635-647.
- Adhikari, K., & Hartemink A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma*, 262, 101-111.
- Ahmed, A. M., & Sulaiman, W. N. (2001). Evaluation of groundwater and soil pollution in a landfill area using electrical resistivity imaging survey. *Environmental management*, 28(5), 655-663.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. D. M., Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728.
- Aranda, N., Elis, V. R., Prado, R. L., Miguel, M. G., Alves de Godoy Leme, M., Conicelli, B., & Guzmán, O. (2021). Electrical resistivity methods to characterize the moisture content in Brazilian sanitary landfill. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(5), 1-15.
- Basso, B., Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., Kravchenko, A., Sartori, L., ... & Gomes, J. (2010). Two-dimensional spatial and temporal variation of soil physical properties in tillage systems using electrical resistivity tomography. *Agronomy Journal*, 102(2), 440-449.



Besson, A., Sger, M., Giot, G., Cousin, I. (2013). Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in-field methods of monitoring. *Geoderma*, 204, 130-139.

Blanchy, G., Watts, C. W., Richards, J., Bussell, J., Huntenburg, K., Sparkes, D. L., ... & Binley, A. (2020). Time-lapse geophysical assessment of agricultural practices on soil moisture dynamics. *Vadose Zone Journal*, 19(1), e20080.

Bottega, E. L., Sari, E. L., de Oliveira, Z. B., & Knies, A. E. (2021). Characterization of the soil compaction based on the mapping of the apparent electrical conductivity. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 29, 405-419.4

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. doi:10.1023/A:1010933404324

Bryla, D. R., Shireman, A. D., & Machado, R. M. (2008, May). Effects of method and level of nitrogen fertilizer application on soil pH, electrical conductivity, and availability of ammonium and nitrate in blueberry. In VI International Symposium on Mineral Nutrition of Fruit Crops 868 (pp. 95-102).

Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., Moramarco, T. (2012). Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *Journal of Hydrology*, 454, 101–112.

Carmo, D. L. D., & Silva, C. A. (2016). Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51, 1762-1772.

Centeno, L. N., Guevara, M. D. F., Ceconello, S. T., de Sousa, R. O., & Timm, L. C. (2017). Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 4(1), 31-37.

Cimpoiaşu, M. O., Kuras, O., Pridmore, T., & Mooney, S. J. (2020). Potential of geoelectrical methods to monitor root zone processes and structure: A review. *Geoderma*, 365, 114232.

Coelho, E. F., Vellame, L. D. M., Coelho Filho, M. A., & Ledo, C. A. D. S. (2006). 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*, 30, 23-30.

Curi, N., Silva, S. H., G.; Poggere, G. C., Menezes, M. D. (2017). Mapeamento de solos e magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais. *Lavras: Ed. UFLA*, 147p.

Cruz, P. G., Pezzopane, J. R. M., dos Santos, P. M., Bosi, C., de Araujo, L. C., & Parmejiani, R. S. (2020). Calibração de sonda de capacitância em latossolo vermelho-amarelo. *Agrometeoros*, 26(2).

Dane JH, Topp GC (eds). 2002. Methods of soil analysis. Part 4: Physical methods. Soil Science Society of America Books Series: 5. Madison, WI: Soil Science Society of America.

- Dick, J., Tetzlaff, D., Bradford, J., Soulsby, C. (2018). Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. *Journal of Hydrology*, 559, 684-697.
- Duan, Z., Yan, X., Sun, Q., Tan, X., & Chen, X. (2021). New models for calculating the electrical resistivity of loess affected by moisture content and NaCl concentration. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-15.
- Evelt, S. R., Tolk, J. A., Howell, T. A. (2006). Soil profile water content determination: sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose Zone Journal*, 5, 894-907.
- Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., Taya, N. (1999). The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering geology*, 54(1-2), 43-53.
- Gasch, C.K.; Brown, D.J.; Brooks, E.S.; Yourek, M.; Poggio, M.; Cobos, D.R.; Campbell, C.S. A pragmatic, automated approach for retroactive calibration of soil moisture sensors using a two-step, soil-specific correction. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 137, p. 29–40, 2017.
- Hadzick, Z. Z., Guber, A. K., Pachepsky, Y. A., Hill, R. L. (2011). Pedotransfer functions in soil electrical resistivity estimation. *Geoderma*, 164, 195–202.
- Hamed, Y., Samy, G., & Persson, M. (2006). Evaluation of the WET sensor compared to time domain reflectometry. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), 671-681.
- Helene, L. P. I., Moreira, C. A., & Bovi, R. C. (2020). Identification of leachate infiltration and its flow pathway in landfill by means of electrical resistivity tomography (ERT). *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 1-10.
- Ibraimo, M. M., Schaefer, C. E. G. R., Ker, J. C., Lani, J. L., Rolim-Neto, F. C., Albuquerque, M. A., & Miranda, V. J. (2004). Gênese e micromorfologia de solos sob vegetação xeromórfica (caatinga) na Região dos Lagos (RJ). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28, 695-712.
- Jayawickreme D. H., Dam R. L. V., Hyndman D. W. (2010). Hydrological consequences of land-cover change: quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. *Geophysics*, 75(4), WA43–WA50.
- Jayawickreme, D. H., Santoni, C. S., Kim, J. H., Jobbagy E. G., Jackson, R. B. (2011). Changes in hydrology and salinity accompanying a century of agricultural conversion in Argentina. *Ecological Applications*, 21(7), 2367–2379.
- Jeřábek, J., Zumr, D., Dostál, T. (2017). Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 174, 231–240.
- Karlen, D. L., Veum, K. S., Sudduth, K. A., Obrycki, J. F., & Nunes, M. R. (2019). Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil and Tillage Research*, 195, 104365.

- Laureano, A. T., Shiraiwa, S. (2008). Ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(2), 173-180.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553.
- Letey, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294. 1985.
- Liaw, A., and M. Wiener. 2002. Classification and regression by randomForest. *R News* 2/3:18–22.
- Loke, M. H., Chambers, J. E., Rucker, D. F., Kuras, O., Wilkinson, P. B. (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of applied geophysics*, 95, 135-156
- Longo, M., Saatchi, S., Keller, M., Bowman, K., Ferraz, A., Moorcroft, P. R., ... & Vincent, G. (2020). Impacts of degradation on water, energy, and carbon cycling of the Amazon tropical forests. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125(8), e2020JG005677.
- Machado, F. C., Montanari, R., Shiratsuchi, L. S., Lovera, L. H., & Lima, E. D. S. (2015). Spatial dependence of electrical conductivity and chemical properties of the soil by electromagnetic induction. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 1112-1120.
- Maffra, C. D. Q. T., & Centeno, J. A. S. (2016). Estimativa da umidade do solo por meio de sensoriamento remoto e suas possíveis aplicações no estudo de deslizamentos de terra. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68, 1709-1719.
- Medeiros, W. N., Valente, D. S. M., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., & Assis, I. R. D. (2018). Apparent soil electrical conductivity in two different soil types1. *Revista Ciência Agronômica*, 49, 43-52.
- Melo, L. B. B., Silva, B. M., Peixoto, D. S., Chiarini, T. P. A., Oliveira, G. C., Curi, N. (2021). Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil and Tillage Research*, 208, 104876.
- Molin, J. P., & Rabello, L. M. (2011). Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Engenharia Agrícola*, 31, 90-101.
- Musgrave, H., Binley, A. (2011). Revealing the temporal dynamics of subsurface temperature in a wetland using time-lapse geophysics. *Journal of Hydrology*, 396(3–4), 258–266.
- Nascimento, C. T. C. D., Ferreira, F. J. F., Andrade, L. R. M. D., Gaspar, J. C., Pires, A. C. B. (2008). Radiação gama e resistividade elétrica em solo com aplicação de carbonatito e fertilizantes agrícolas no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1), 21-29.
- Nosetto M. D., Acosta A. M., Jayawickreme D. H., Ballesteros S. I., Jackson R. B., Jobbagy E. G. (2013). Land use and topography shape soil and groundwater salinity in central Argentina. *Agricultural Water Management*, 129, 120–129.

- Paglis, C. M. (2013). Application of electrical resistivity tomography for detecting root biomass in coffee trees. *International Journal of Geophysics*, 2013.
- Pedrotti, A., Ferreira, M. M., Curi, N., Silva, M. L. N., Lima, J. M. D., & Carvalho, R. (2003). Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 01-09.
- Peixoto, D. S., Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Moreira, S. G., da Silva, F., & Curi, N. (2019). A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 194, 104307.
- Pires, A. A., Monnerat, P. H., Marciano, C. R., Pinho, L. G. D. R., Zampiroli, P. D., Rosa, R. C. C., & Muniz, R. A. (2008). Efeito da adubação alternativa do maracujazeiro-amarelo nas características químicas e físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1997-2005.
- Pizetta, S. C., Rodrigues, R. R., Pereira, G. M., Pacheco, F. E. D., Viola, M. R., & Lima, L. A. (2017). Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. *Irriga*, 22(3), 458-468.
- Ramos, F. T., Dores, E. F. D. C., Weber, O. L. D. S., Beber, D. C., Campelo Jr, J. H., & Maia, J. C. D. S. (2018). Soil organic matter doubles the cation exchange capacity of tropical soil under no-till farming in Brazil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(9), 3595-3602.
- Ramos, F. T., Pivetta, F., de MATOS, V. A. T., de Barros Seixas, G., & Júnior, J. H. C. (2014). Acurácia e calibração de uma sonda de capacitância em um neossolo quartzarênico cultivado com caju. *Bioscience Journal*, 30(6).
- Rhoades, J. D., Manteghi, N. A., Shouse, P. J., Alves, W. J. (1989). Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 433–439.
- Rinaldi, V. A., Cuestas, G. A. (2002). Ohmic conductivity of a compacted silty clay. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(10), 824–835.
- Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T., & Or, D. (2018). A review of geophysical methods for soil structure characterization. *Reviews of Geophysics*, 56(4), 672-697.
- Rühlmann, J., Körschens, M., & Graefe, J. (2006). A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. *Geoderma*, 130(3-4), 272-283.
- Samouëlian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A., Richard, G. (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil and Tillage Research*, 83(2), 173–193.
- Santos, H.G., Jacomine, P.K.T., dos Anjos, L.H.C., de Oliveira, V.A., de Oiveira, J.B. de, Coelho, M.R., Lumbrelas, J.F., Cunha, T.J.F. da, 2014. Sistema brasileiro de classificação de solos., 4 ed, Embrapa Solos-Livros técnicos (INFOTECA-E). Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro.

- Séger, M., Cousin, I., Frison, A., Boizard, H., Richard, G. (2009). Characterisation of the structural heterogeneity of the soil tilled layer by using in situ 2D and 3D electrical resistivity measurements. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 387-398.
- Sevostianova, E., Deb, S., Serena, M., VanLeeuwen, D., & Leinauer, B. (2015). Accuracy of two electromagnetic soil water content sensors in saline soils. *Soil Science Society of America Journal*, 79(6), 1752-1759.
- Silva, B. M., Oliveira, G. C. D., Serafim, M. E., Silva Júnior, J. J. D., Colombo, A., Lima, J. M. D. (2012). Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(2), 277-286.
- Thompson, R. B., Gallardo, M., Fernández, M. D., Valdez, L. C., & Martínez-Gaitan, C. (2007). Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6), 1647-1657.
- Valente, D. S., Queiroz, D. M. D., Pinto, F. D. A. D. C., Santos, F. L., & Santos, N. T. (2014). Spatial variability of apparent electrical conductivity and soil properties in a coffee production field.
- Verdade, F. (1956). Influência da matéria orgânica na capacidade de troca de cátions do solo. *Bragantia*, 15(UNICO), 35-42.
- Zeng, Y., Feng, Z., & Xiang, N. (2004, September). Assessment of soil moisture using Landsat ETM+ temperature/vegetation index in semiarid environment. In *IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Vol. 6, pp. 4306-4309)*.

### **Considerações Finais**

A  $\rho$  correlacionou-se com o Na, podendo assim ser utilizada em manejo de solos com concentração de solutos variáveis. Assim, a TRE pode contribuir como ferramenta útil para estimar o  $\theta$  e a concentração de solutos, pode ser utilizada em agricultura de precisão indicando a variabilidade da concentração de solutos no solo, sendo ferramenta útil para indicar a fertilidade ou contaminação do solo. Portanto, a  $\rho$  pode ser uma das ferramentas utilizadas como indicadora da qualidade ou da saúde do solo.

ANEXOS

**Tabela 3**

Parâmetros para os modelos (potencial, logarítmico, polinomial, exponencial e linear) ajustadas para relação entre conteúdo de água ( $\theta$ ) e condutividade elétrica ( $\sigma$ ) para um CXbe, PVd e LVe com concentrações de solutos de (10, 15, 25 e 50 dS/m) e sem adição de NaCl (controle).

Concentração de solutos	CXbe				PVd				LVe			
	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC	Equação	R <sup>2</sup>	RMSE	AIC
Controle (n = 57, 54, 57)	$\theta=0.401\sigma^{0.2698}$	0.90	0.035	-220.9 9	$\theta=0.4225\sigma^{0.2251}$	0.92	0.030	-220.3 4	$\theta=0.4698\sigma^{0.2312}$	0.92	0.031	-230.0 8
	$\theta=0.0946\ln(\sigma)+0.4142$	0.94	0.027	-245.6 3	$\theta=0.0826\ln(\sigma)+0.4341$	0.93	0.028	-225.7 6	$\theta=0.0876\ln(\sigma)+0.4759$	0.92	0.031	-229.0 1
	$\theta=-0.0306\sigma^2+0.1939\sigma+0.2347$	0.88	0.038	-203.4 0	$\theta=-0.0317\sigma^2+0.1958\sigma+0.2552$	0.90	0.035	-202.1 3	$\theta=-0.0589\sigma^2+0.2817\sigma+0.2591$	0.91	0.033	-217.9 8
	$\theta=0.2786e^{0.2082\sigma}$	0.60	0.071	-142.6 1	$\theta=0.2958e^{0.1968\sigma}$	0.63	0.068	-138.2 3	$\theta=0.3082e^{0.2712\sigma}$	0.58	0.075	-138.0 4
	$\theta=0.0769\sigma+0.2824$	0.70	0.058	-156.0 7	$\theta=0.0762\sigma+0.2993$	0.72	0.057	-150.8 2	$\theta=0.1093\sigma+0.3115$	0.70	0.060	-152.7 2
10 dS/m (n = 60, 65, 59)	$\theta=0.1815\sigma^{0.3754}$	0.88	0.039	-223.8 4	$\theta=0.1865\sigma^{0.3758}$	0.79	0.054	-190.9 0	$\theta=0.2334\sigma^{0.3459}$	0.88	0.040	-206.3 4
	$\theta=0.1139\ln(\sigma)+0.1706$	0.80	0.049	-186.6 3	$\theta=0.1131\ln(\sigma)+0.1826$	0.74	0.059	-177.3 8	$\theta=0.1137\ln(\sigma)+0.2413$	0.86	0.044	-195.7 2
	$\theta=0.0005\sigma^2+0.0225\sigma+0.1649$	0.95	0.025	-264.3 2	$\theta=0.0004\sigma^2+0.0259\sigma+0.1671$	0.82	0.050	-197.1 3	$\theta=-0.0098\sigma^2+0.0519\sigma+0.186$	0.87	0.473	-199.0 9
	$\theta=0.1773e^{0.0911\sigma}$	0.94	0.028	-258.8 4	$\theta=0.1791e^{0.0955\sigma}$	0.81	0.051	-196.8 5	$\theta=0.2258e^{0.0917\sigma}$	0.79	0.056	-174.9 8
	$\theta=0.0294\sigma+0.1497$	0.94	0.026	-262.1 0	$\theta=0.302\sigma+0.1595$	0.82	2.167	-198.8 0	$\theta=0.032\sigma+0.2199$	0.85	0.046	-190.5 3

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS  
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo

55

15 dS/m (n = 113, 100, 105)	$\theta=0.133\sigma^{0.4264}$	0.90	0.035	-428.9 8	$\theta=0.178\sigma^{0.3415}$	0.88	0.040	-359.5 1	$\theta=0.2089\sigma^{0.3523}$	0.89	0.044	-367.7 2
	$\theta=0.1421\ln(\sigma)+0.0468$	0.88	0.038	-413.3 3	$\theta=0.1048\ln(\sigma)+0.1628$	0.82	0.049	-311.2 7	$\theta=0.12\ln(\sigma)+0.2008$	0.81	0.056	-301.4 1
	$\theta=-0.0007\sigma^2+0.0324\sigma+0.1099$	0.92	0.032	-459.2 5	$\theta=-0.0005\sigma^2+0.0278\sigma+0.1562$	0.91	0.036	-375.8 7	$\theta=-0.0008\sigma^2+0.0401\sigma+0.1633$	0.92	0.036	-393.7 5
	$\theta=0.2205e^{0.0379\sigma}$	0.77	0.056	-341.1 8	$\theta=0.2001e^{0.0563\sigma}$	0.81	0.054	-315.6 8	$\theta=0.215e^{0.0748\sigma}$	0.83	0.058	-319.9 2
$\theta=0.0133\sigma+0.2071$	0.84	0.044	-376.2 1	$\theta=0.0186\sigma+0.1864$	0.88	0.039	-357.5 8	$\theta=0.0272\sigma+0.1968$	0.91	0.040	-372.3 3	
25 dS/m (n = 76, 82, 83)	$\theta=0.1531\sigma^{0.3515}$	0.83	0.043	-257.8 4	$\theta=0.1658\sigma^{0.3547}$	0.95	0.025	-367.7 2	$\theta=0.2342\sigma^{0.2749}$	0.91	0.040	-308.6 2
	$\theta=0.1104\ln(\sigma)+0.1113$	0.83	0.043	-256.7 7	$\theta=0.1199\ln(\sigma)+0.1171$	0.92	0.031	-332.9 6	$\theta=0.0941\ln(\sigma)+0.2384$	0.81	0.055	-240.0 6
	$\theta=-0.0004\sigma^2+0.0241\sigma+0.1438$	0.87	0.037	-276.1 7	$\theta=-0.0004\sigma^2+0.0251\sigma+0.1625$	0.96	0.022	-393.5 9	$\theta=-0.0008\sigma^2+0.0351\sigma+0.1773$	0.95	0.030	-345.5 5
	$\theta=0.2441e^{0.0257\sigma}$	0.58	0.073	-193.2 3	$\theta=0.2416e^{0.0328\sigma}$	0.74	0.062	-243.1 3	$\theta=0.25e^{0.0448\sigma}$	0.71	0.076	-214.4 9
$\theta=0.0087\sigma+0.2478$	0.69	0.058	-210.5 6	$\theta=0.0118\sigma+0.2345$	0.86	0.041	-283.2 6	$\theta=0.0168\sigma+0.2466$	0.84	0.051	-253.2 5	
50 dS/m (n = 97, 110, 112)	$\theta=0.2298\sigma^{0.1854}$	0.92	0.020	-478.6 5	$\theta=0.1993\sigma^{0.2372}$	0.95	0.018	-570.1 1	$\theta=0.2224\sigma^{0.2241}$	0.95	0.017	-588.7 9
	$\theta=0.069\ln(\sigma)+0.1998$	0.90	0.023	-454.0 7	$\theta=0.0919\ln(\sigma)+0.1378$	0.94	0.018	-562.4 1	$\theta=0.0959\ln(\sigma)+0.1548$	0.94	0.018	-573.6 7
	$\theta=-0.00006\sigma^2+0.0071\sigma+0.2765$	0.91	0.022	-456.8 7	$\theta=-0.00009\sigma^2+0.0093\sigma+0.254$	0.94	0.018	-560.5 4	$\theta=-0.00007\sigma^2+0.0082\sigma+0.2921$	0.95	0.193	-582.2 2
	$\theta=0.306e^{0.0096\sigma}$	0.83	0.029	-405.6 9	$\theta=0.3009e^{0.0115\sigma}$	0.87	0.027	-476.5 5	$\theta=0.3358e^{0.0099\sigma}$	0.88	0.027	-487.1 5
$\theta=0.0037\sigma+0.3033$	0.86	0.027	-422.6 0	$\theta=0.0045\sigma+0.2947$	0.90	0.024	-501.7 3	$\theta=0.0043\sigma+0.3291$	0.91	0.024	-517.7 0	

55

**Tabela 4**

Caracterização dos solos de acordo com cada tratamento.

			Controle	10 dSm <sup>-1</sup>	15 dSm <sup>-1</sup>	25 dSm <sup>-1</sup>	50 dSm <sup>-1</sup>
CXbe			0.46*(0.09**)	6.29 (0.10)	9.74 (0.51)	15.01 (0.83)	56.09 (3.98)
PVd	σ lab	mScm <sup>-1</sup>	0.63 (0.17)	4.96 (0.72)	14.01 (1.68)	23.27 (10.36)	44.82 (8.89)
LVe			0.59 (0.03)	5.00 (0.56)	11.04 (2.33)	18.67 (6.82)	48.69 (1.46)
CXbe			41.77 (1.64)	39.63 (2.96)	27.32 (1.28)	37.70 (2.20)	36.63 (1.39)
PVd	Areia		37.97 (1.12)	34.63 (2.54)	37.69 (2.56)	24.57 (1.39)	28.50 (2.71)
LVe			30.10 (0.85)	28.01 (0.31)	30.63 (3.30)	24.28 (0.70)	23.99 (1.77)
CXbe			26.40 (4.14)	24.09 (4.00)	45.70 (9.39)	22.94 (7.23)	34.55 (8.55)
PVd	Silte	%	21.08 (7.06)	24.58 (3.60)	31.65 (14.11)	30.21 (2.08)	35.41 (9.22)
LVe			27.99 (1.74)	24.67 (12.17)	31.02 (7.75)	36.75 (9.43)	39.88 (7.66)
CXbe			31.83 (4.61)	36.28 (4.87)	26.98 (8.67)	39.35 (7.22)	28.81 (7.53)
PVd	Argila		40.95 (7.24)	40.79 (4.39)	30.66 (14.17)	45.22 (2.34)	36.09 (10.33)
LVe			41.90 (2.51)	47.33 (12.33)	38.35 (9.59)	38.97 (9.25)	36.13 (6.45)
CXbe			1689.71 (71.90)	1735.95 (63.07)	1812.65 (125.68)	1753.82 (69.19)	1780.92 (105.15)
PVd	Ds	kgdm <sup>-3</sup>	1600.08 (66.92)	1664.09 (80.34)	1702.80 (84.74)	1750.00 (23.01)	1789.24 (36.29)
LVe			1622.70 (56.65)	1519.10 (39.72)	1554.92 (70.58)	1551.79 (106.81)	1622.45 (87.52)
CXbe			2325.58 (0.00)	2409.64 (0.00)	2564.10 (0.00)	2666.67 (0.00)	2469.14 (0.00)
PVd	Dp		2325.58 (0.00)	2500.00 (0.00)	2666.67 (0.00)	2597.40 (0.00)	2564.10 (0.00)
LVe			2439.02 (0.00)	2439.02 (0.00)	2739.73 (0.00)	2666.67 (0.00)	2631.58 (0.00)
CXbe			0.27 (0.03)	0.28 (0.03)	0.29 (0.05)	0.34 (0.03)	0.30 (0.04)
PVd	Pt	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	0.31 (0.03)	0.33 (0.03)	0.36 (0.03)	0.33 (0.01)	0.28 (0.01)
LVe			0.33 (0.02)	0.38 (0.02)	0.43 (0.03)	0.42 (0.04)	0.38 (0.03)
CXbe			131.56 (29.67)	219.34 (79.33)	214.73 (43.81)	211.37 (30.78)	198.08 (41.59)
PVd	K		337.00 (82.55)	231.21 (22.57)	194.08 (43.58)	173.26 (45.23)	193.53 (19.47)
LVe			255.96 (64.01)	311.34 (33.84)	423.88 (102.44)	518.16 (148.76)	873.67 (59.41)
CXbe			38.13 (12.51)	39.25 (10.69)	24.58 (22.66)	28.26 (12.79)	27.54 (3.59)
PVd	P	mgdm <sup>-3</sup>	18.01 (6.96)	13.34 (6.11)	3.86 (2.83)	2.73 (1.94)	3.26 (2.65)
LVe			9.22 (1.45)	47.15 (56.44)	26.64 (3.17)	16.00 (7.62)	23.21 (14.57)
CXbe			163.50 (167.40)	345.25 (91.51)	386.00 (78.67)	426.25 (0.96)	427.75 (0.50)
PVd	Na		81.75 (56.77)	385.25 (79.5)	385.00 (78.00)	386.50 (79.00)	428.00 (0.00)
LVe			87.00 (64.38)	345.25 (91.51)	424.00 (0.00)	386.50 (79.00)	428.25 (0.50)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS  
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo

57

CXbe			3.75 (0.66)	2.71 (0.40)	2.57 (0.80)	2.74 (0.43)	2.85 (0.46)
PVd	Ca		3.59 (0.21)	1.89 (0.12)	1.89 (0.26)	1.71 (0.23)	2.51 (0.40)
LVe			4.06 (0.27)	3.33 (0.75)	4.22 (1.36)	3.29 (0.28)	4.13 (0.62)
CXbe			0.79 (0.11)	0.65 (0.12)	0.73 (0.29)	0.64 (0.08)	0.65 (0.16)
PVd	Mg		1.03 (0.13)	0.45 (0.03)	0.54 (0.10)	0.43 (0.03)	0.66 (0.10)
LVe			1.06 (0.19)	0.93 (0.35)	1.27 (0.41)	1.01 (0.07)	1.69 (0.21)
CXbe			0.10 (0.00)	0.07 (0.05)	0.02 (0.05)	0.07 (0.05)	0.05 (0.06)
PVd	Al		0.15 (0.06)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.02 (0.05)
LVe			0.05 (0.06)	0.05 (0.06)	0.02 (0.05)	0.00 (0.00)	0.05 (0.06)
CXbe		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	7.00 (5.95)	3.80 (0.94)	4.65 (2.26)	3.72 (0.43)	3.25 (0.60)
PVd	H+Al		4.52 (1.98)	7.60 (4.95)	4.97 (3.00)	3.25 (0.76)	4.92 (1.90)
LVe			3.97 (0.85)	6.15 (4.22)	3.07 (1.19)	3.57 (3.16)	2.75 (0.82)
CXbe			4.88 (0.71)	3.92 (0.31)	3.86 (1.14)	3.93 (0.45)	4.01 (0.56)
PVd	SB		5.48 (0.47)	2.93 (0.10)	2.93 (0.45)	2.58 (0.30)	3.67 (0.44)
LVe			5.78 (0.48)	5.06 (1.13)	6.58 (1.73)	5.62 (0.44)	8.06 (0.96)
CXbe			4.98 (0.71)	4.00 (0.36)	3.88 (1.15)	4.00 (0.50)	4.06 (0.60)
PVd	t		5.63 (0.48)	2.93 (0.10)	2.93 (0.45)	2.58 (0.30)	3.70 (0.48)
LVe			5.83 (0.50)	5.11 (1.19)	6.60 (1.69)	5.62 (0.44)	8.11 (0.94)
CXbe			11.88 (6.37)	7.72 (1.15)	8.51 (1.54)	7.65 (0.68)	7.26 (1.09)
PVd	T		10.01 (1.69)	10.53 (4.86)	7.91 (2.84)	5.83 (0.94)	8.60 (1.87)
LVe			9.75 (0.40)	11.21 (3.64)	9.65 (1.61)	9.2 (2.77)	10.81 (1.06)
CXbe			46.65 (14.44)	51.30 (5.23)	47.45 (18.41)	51.31 (3.79)	55.32 (3.00)
PVd	V		56.11 (11.29)	31.51 (10.58)	40.44 (14.38)	44.68 (4.87)	44.08 (9.95)
LVe			59.45 (7.30)	49.65 (20.73)	67.88 (12.32)	65.29 (18.53)	74.65 (6.84)
CXbe			2.04 (0.32)	1.81 (1.21)	0.57 (1.15)	1.77 (1.18)	1.15 (1.34)
PVd	m		2.66 (1.01)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.00 (0.00)	0.57 (1.15)
LVe			0.83 (0.96)	0.82 (0.95)	0.53 (1.07)	0.00 (0.00)	0.65 (0.76)
CXbe			5.14 (0.09)	5.88 (0.90)	5.82 (0.97)	6.13 (0.20)	6.14 (0.56)
PVd	pH H <sub>2</sub> O	%	5.26 (0.25)	4.99 (0.10)	5.25 (0.18)	5.41 (0.18)	5.19 (0.25)
LVe			5.44 (0.07)	5.85 (0.26)	5.29 (0.12)	5.11 (0.11)	4.90 (0.11)
CXbe			5.06 (0.40)	4.88 (0.13)	5.96 (0.32)	5.73 (0.21)	5.28 (0.01)
PVd	pH KCl		4.79 (0.18)	4.73 (0.05)	5.00 (0.51)	4.99 (0.11)	4.79 (0.21)
LVe			5.01 (0.04)	5.45 (0.29)	4.97 (0.12)	4.87 (0.09)	4.70 (0.15)
CXbe			-0.07 (0.32)	-0.99 (0.77)	0.15 (0.90)	-0.40 (0.19)	-0.86 (0.55)
PVd	Δ pH		-0.47 (0.10)	-0.26 (0.07)	-0.25 (0.41)	-0.42 (0.09)	-0.39 (0.14)
LVe			-0.42 (0.04)	-0.39 (0.16)	-0.32 (0.02)	-0.24 (0.05)	-0.20 (0.05)
CXbe			34.70 (4.88)	30.20 (3.73)	33.92 (4.18)	38.95 (4.11)	38.62 (2.16)
PVd	P-Rem	mgL <sup>-1</sup>	27.45 (1.92)	21.07 (1.81)	22.35 (0.38)	23.35 (1.78)	26.22 (1.52)

57

UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS  
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo

58

LVe			21.22 (1.81)	22.75 (2.02)	23.85 (2.42)	24.17 (2.42)	30.22 (2.58)
CXbe			2.42 (0.54)	2.77 (0.97)	1.75 (0.45)	2.36 (0.32)	2.17 (0.38)
PVd	MOS	dagkg <sup>-1</sup>	2.84 (0.38)	3.93 (0.08)	2.16 (0.28)	1.76 (0.22)	1.89 (0.16)
LVe			2.98 (0.14)	1.84 (0.49)	4.82 (1.37)	5.00 (0.82)	4.71 (0.29)

\*Médias das 4 repetições; \*\* desvio padrão.  $\sigma$  lab = condutividade elétrica determinada em laboratório pelo método padrão; Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; Pt = porosidade total; K = potássio; P = fósforo; Na = sódio; Ca = cálcio; Mg = magnésio; Al = alumínio; H + Al = hidrogênio e alumínio; SB = soma de bases; t = capacidade de troca de cátions efetiva; T = capacidade de troca de cátions a pH 7; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; pH H<sub>2</sub>O = pH em água; pH KCl = pH em KCl;  $\Delta$  pH = delta pH: pH H<sub>2</sub>O – pH KCl; P-Rem = fósforo remanescente; MOS = Matéria orgânica do solo.

## APÊNDICES

```
library(openxlsx)
library(caret)
library(randomForest)
library(tidyverse)

#análise 1
#RES SOLO SATURADO

dados <- read.xlsx("analise_1_res_sat.xlsx", sheet = 1)
dados

summary(dados)

#Adicionando base para amostras de treinamento
set.seed(724828)
ind<-createDataPartition(dados$RES.saturated.soil,p =0.8,times=1, list = F)
#treino e teste
treino<-dados[ind,]
teste<- dados[-ind,]

#Random Forest
set.seed(724828)
rf<- randomForest (x=treino[,-1],
  y=treino$RES.saturated.soil,
  xtest=teste[,-1],
  ytest=teste$RES.saturated.soil,
  ntree= 300,
  mtry = 10,
  replace=T,
  nodesize = 10,
  maxnodes = 10,
  keep.forest = T,type = "regression",
  quantiles = c(0.05, 0.25, 0.75, 0.95))

varImpPlot(rf)
```

```
rf

plot(rf)
getTree (rf,1)

importance(rf) #importância numérica das variáveis

varUsed(rf)
varImpPlot(rf,
            sort = TRUE,
            n.var = 10)

#R² e RMSE
set.seed(724828)
data_pred_rf <- predict(rf, teste)
acuracy_rf <- postResample(pred = data_pred_rf, obs = teste$RES.saturated.soil)
acuracy_rf

#análise 2
# RES SOLO SECO
set.seed(8747928429)
datadry <- read.xlsx("analise_2_res_seco.xlsx", sheet = 1)
datadry
summary(datadry)

#treino e teste
treino2<-datadry[1:9,] #utilizando 75% da base para testes
teste2<- datadry[10:12,]
```

```
#Random Forest
set.seed(8747928429)
rf2<- randomForest (x=treino2[,-1],
                    y=treino2$RES.dry.soil,
                    xtest=teste2[,-1],
                    ytest=teste2$RES.dry.soil,
                    ntree= 300,
                    mtry = 10,
                    replace=T,
                    nodesize = 10,
                    maxnodes = 10,
                    keep.forest = T,type = "regression",
                    quantiles = c(0.05, 0.25, 0.75, 0.95)
)
varImpPlot(rf2)
rf2

plot(rf2)
getTree (rf2,1)

importance(rf2)

varUsed(rf2)
varImpPlot(rf2,
           sort = TRUE,
           n.var = 10)

#R² e RMSE
set.seed(8747928429)
data_pred_rf2 <- predict(rf2, teste2)
acuracy_rf2 <- postResample(pred = data_pred_rf2, obs = teste2$RES.dry.soil)
acuracy_rf2
```

```
#análise 3
#RANDOM FOREST CE LAB

dados3 <- read.xlsx("analise_3_celab.xlsx", sheet = 1)
dados3
summary(dados3)

#Adicionando base para amostras de treinamento
set.seed(26572842)
ind3 <- createDataPartition(dados3$EC.lab, p = 0.8, times = 1, list = F)

#treino e teste
treino3 <- dados3[ind3, ]
teste3 <- dados3[-ind3, ]

#Random Forest
set.seed(26572842)
rf3<- randomForest (x=treino3[,-1],
                    y=treino3$EC.lab,
                    xtest=teste3[,-1],
                    ytest=teste3$EC.lab,
                    ntree= 300,
                    mtry = 10,
                    replace=T,
                    nodesize = 10,
                    maxnodes = 10,
                    keep.forest = T,type = "regression",
                    quantiles = c(0.05, 0.25, 0.75, 0.95))

varImpPlot(rf3)
rf3

plot(rf3)
getTree (rf3,1)

importance(rf3)
```

```
varUsed(rf3)
varImpPlot(rf3,
            sort = TRUE,
            n.var = 10)

#R² e RMSE
set.seed(26572842)
data_pred_rf3 <- predict(rf3, teste3)
acuracy_rf3 <- postResample(pred = data_pred_rf3, obs = teste3$EC.lab)
acuracy_rf3

#análise 4
#RES SOLO SATURADO CONTROLE
dados4 <- read.xlsx("analise4_controle_res_sat.xlsx", sheet = 1)
dados4

summary(dados4)

#treino e teste
set.seed(724828)
treino4<-dados4[1:9,] #utilizando 75% da base para testes
teste4<- dados4[10:12,]
```

```
#Random Forest
set.seed(724828)
rf4<- randomForest (x=treino4[,-1],
                    y=treino4$RES.saturated.soil,
                    xtest=teste4[,-1],
                    ytest=teste4$RES.saturated.soil,
                    ntree= 300,
                    mtry = 10,
                    replace=T,
                    nodesize = 10,
                    maxnodes = 10,
                    keep.forest = T,type = "regression",
                    quantiles = c(0.05, 0.25, 0.75, 0.95))

varImpPlot(rf4)
rf4

plot(rf4)
getTree (rf4,1)

importance(rf4)

varUsed(rf4)
varImpPlot(rf4,
           sort = TRUE,
           n.var = 10)

#R² e RMSE
set.seed(724828)
data_pred_rf4 <- predict(rf4, teste4)
acuracy_rf4 <- postResample(pred = data_pred_rf4, obs = teste4$RES.saturated.soil)
acuracy_rf4
```



```
#análise 5
#RES SOLO SECO CONTROLE
dados5 <- read.xlsx("analise5_controle_dry.xlsx", sheet = 1)
dados5
summary(dados5)

#treino e teste
set.seed(724828)
treino5<-dados5[1:9,] #utilizando 75% da base para testes
teste5<- dados5[10:12,]

#Random Forest
set.seed(230098)
rf5<- randomForest (x=treino5[,-1],
                    y=treino5$RES.dry.soil,
                    xtest=teste5[,-1],
                    ytest=teste5$RES.dry.soil,
                    ntree= 3000,
                    mtry = 10,
                    replace=T,
                    nodesize = 10,
                    maxnodes = 10,
                    keep.forest = T,type = "regression",
                    quantiles = c(0.05, 0.25, 0.75, 0.95))

varImpPlot(rf5)
rf5

plot(rf5)
getTree (rf5,1)

importance(rf5)
```

```
varUsed(rf5)
varImpPlot(rf5,
            sort = TRUE,
            n.var = 10)

#R² e RMSE
set.seed(230098)
data_pred_rf5 <- predict(rf5, teste5)
acuracy_rf5 <- postResample(pred = data_pred_rf5, obs = teste5$RES.dry.soil)
acuracy_rf5
```