



JOSIEL DE JESUS SANTOS

**APLICAÇÃO DE PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS
NO DIAGNÓSTICO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

**LAVRAS – MG
2023**

JOSIEL DE JESUS SANTOS

**APLICAÇÃO DE PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS NO DIAGNÓSTICO
DA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do 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
2023**

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

Santos, Josiel de Jesus.

Aplicação de propriedades eletromagnéticas no diagnóstico da compactação do solo / Josiel de Jesus Santos. - 2023.

65 p. : il.

Orientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Compactação do Solo. 2. Resistividade elétrica do solo. 3. Machine learning. I. Silva, Bruno Montoani. II. Título.

JOSIEL DE JESUS SANTOS

**APLICAÇÃO DE PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS NO DIAGNÓSTICO
DA COMPACTAÇÃO DO SOLO**

**APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC PROPERTIES IN DIAGNOSIS OF SOIL
COMPACTION**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do 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 13 de outubro de 2023
Prof. Dr(a) Renata Andrade UFLA
Prof. Dr. Milson Evaldo Serafim IFMT

Documento assinado digitalmente
 BRUNO MONTANOI SILVA
Data: 04/01/2024 11:35:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Orientador

LAVRAS-MG
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre foi a minha base, me dando forças diariamente e ânimo para seguir em frente e chegar até aqui, muitas foram as lutas que surgiram durante esse tempo, mas Deus foi meu braço forte, meu abrigo, auxílio e protetor, em tudo eu via às mãos D'Ele, cuidando de mim em cada detalhe, e sem Ele, eu não teria vencido. Obrigado meu Deus.

À minha família - pela qual tenho um grande apreço - minha enorme gratidão. Meus pais José e Valdete, que sempre oraram por mim, e meus irmãos Josimar e Géssica. Minha família foi, sem dúvida, meu porto seguro em cada momento, e mesmo de longe, sempre se mostraram presentes, me apoiaram e me encorajaram a seguir em frente. Meus agradecimentos também a todos os meus familiares de um modo geral, pela força e torcida para que tudo desse certo, é uma honra me tornar o primeiro mestre da família Santos e da família Servano. Essa conquista é nossa!

Agradeço também aos amigos, aos de longa data, e aos que adquiri na UFLA durante esse tempo, em especial aos amigos do “Diário do Josidres”, que tenho como minha segunda família, o companheirismo destes para comigo foi muitíssimo importante, tornando a caminhada mais leve, me fazendo ter a certeza de que eu nunca estive sozinho e que eu tenho potencial. Externo também os meus agradecimentos aos colegas de república – da Sanjamaica e da Canta Galo – obrigado por tudo, amo todos vocês.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), por me proporcionarem toda a estrutura necessária para a realização desse sonho. A todos os professores e técnicos, em especial ao Doroteo (técnico do laboratório de física do solo) que contribuíram para a minha formação profissional, meu muito obrigado.

Um agradecimento especial ao professor Dr. Bruno Montoani, meu orientador, sou muito grato pelo companheirismo, pelos ensinamentos e pela enorme contribuição na minha formação, agradeço pela confiança e pelas oportunidades a mim concedidas, se mostrando um excelente profissional em todos os momentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), deixo minha gratidão.

Agradeço também a equipe da física do solo e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o meu sucesso e torceram por mim, meu muito obrigado!

RESUMO

A compactação do solo é um processo em que ocorre redução dos poros, devido à acomodação e aproximação das partículas, tornando o solo mais denso, sendo o principal fator de degradação física dos solos agrícolas. Os métodos mais precisos para o diagnóstico da compactação, demandam equipamentos e pessoal treinado, além de serem demorados e trabalhosos. Como alternativa, os métodos geofísicos, são rápidos e práticos, não destrutivos, e podem representar uma alternativa eficaz para este fim. As propriedades eletromagnéticas do solo se relacionam com diversos atributos do mesmo, e, apontam padrões que podem ser interpretados quanto a alterações na estrutura do solo. Assim, o objetivo deste trabalho é diagnosticar a compactação com base em propriedades eletromagnéticas do solo. O experimento foi desenvolvido na Fazenda Muquém – UFLA em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura argilosa, com o delineamento experimental em 3 blocos casualizados em esquema fatorial 3x2 (3 níveis de compactação e 2 manejos do solo). Os níveis de compactação foram obtidos por meio de compactação adicional utilizando-se um trator, e os manejos foram Subsolagem (S) e Controle (C) – Ausência de subsolagem. Foram realizadas coletas de amostras indeformadas para avaliação da Densidade do solo (D_s) e porosidade, e deformadas, para análises químicas e suscetibilidade Magnética (SM). Em campo, foi medida a resistência do solo à penetração (RP) e Resistividade elétrica (ρ). RP e ρ foram avaliadas em diferentes condições de umidade do solo e até 60 cm de profundidade. Foram realizadas correlações entre as diferentes profundidades avaliadas, em que os dados de entrada foram os dados das propriedades eletromagnéticas (ρ e SM), e como dado de entrada auxiliar foram utilizados os resultados das análises químicas do solo, e como dados de saída, teremos os atributos físicos que servem como base para diagnosticar a compactação do solo, sendo eles, a D_s , a RP e a macroporosidade. A modelagem foi realizada com base em 4 modelos de predição (Linear, Linear generalizado, Random Forest e Random Forest categórico), sendo esses dois últimos, utilizando o *Machine learning*. Os modelos de *Machine learning* se mostraram mais promissores, tanto para predição das propriedades físicas, quanto da predição categórica se o solo estava ou não compactado, a condição de umidade do solo e a profundidade de avaliação influenciaram nos resultados, com maior destaque para a umidade na faixa de 28% e a profundidade de 20-30cm.

Palavras-chave: Resistividade elétrica do solo. Suscetibilidade magnética. Atributos do solo. Machine learning.

ABSTRACT

Soil compaction is a process in which pores are reduced, due to the relocation and approximation of particles, making the soil denser, being the main factor in the physical degradation of agricultural soils. The most accurate methods for diagnosing compaction require equipment and trained personnel, in addition to being time-consuming and laborious. Alternatively, geophysical methods are fast and practical, non-destructive and can represent an effective alternative for this purpose. The electromagnetic properties of the soil are related to several attributes of the soil, and point out patterns that can be interpreted regarding changes in the soil structure. Therefore, the objective of this work is to diagnose compaction based on electromagnetic properties of the soil. The experiment was carried out at Fazenda Muquém – UFLA in a typical dystrophic Red Yellow Oxisol with a clayey texture, with the experimental design in 3 randomized blocks in a 3x2 factorial scheme (3 levels of compaction and 2 soil management). Compaction levels were obtained through additional compaction using a tractor, and the managements were Subsoiling (S) and Control (C) – Absence of subsoiling. Undisturbed samples were collected to evaluate soil density (Ds) and porosity, and deformed samples were collected for chemical analyzes and Magnetic Susceptibility (SM). In the field, soil resistance to penetration (RP) and electrical resistivity (ρ) were measured. RP and ρ were evaluated under different soil moisture conditions and up to 60 cm depth. Correlations were carried out between the different depths evaluated, in which the input data were data on electromagnetic properties (ρ and SM), and as auxiliary input data the results of chemical analyzes of the soil were used, and as output data, we will have the physical attributes that serve as a basis for diagnosing soil compaction, namely Ds, RP and macroporosity. The modeling was carried out based on 4 prediction models (Linear, Generalized Linear, Random Forest and Categorical Random Forest), the latter two using Machine Learning. Machine Learning models were presented as more promising, both for the prediction of physical properties and the categorical prediction of whether or not the soil was compacted, the soil moisture condition and the evaluation depth influenced the results, with greater emphasis on the humidity in the range of 28% and depth of 20-30cm.

Keywords: Soil electrical resistivity. Magnetic susceptibility. Soil attributes. Machine learning

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. HIPÓTESES	9
3. OBJETIVOS	10
4. REVISÃO DE LITERATURA	10
4.1 Compactação do solo	10
4.2 Diagnóstico da compactação do solo	11
4.2.1 Resistência do solo à penetração (RP)	12
4.2.2 Densidade do solo (Ds)	13
4.2.3 Macroporosidade	13
4.3 Propriedades eletromagnéticas do solo	14
4.4 Propriedades eletromagnéticas e diagnóstico da compactação do solo.....	16
4.5 Equipamentos móveis de avaliação de propriedades eletromagnéticas do solo.....	19
5. MATERIAL E MÉTODOS	22
5.1 Descrição da área experimental.....	22
5.2 Delineamento experimental.....	22
5.3 Coletas e Avaliações	24
5.3.1 Amostras indeformadas	24
5.3.2 Amostras deformadas	27
5.3.3 Resistividade Elétrica do solo (ρ)	28
5.3.4 Resistência do solo à Penetração (RP)	33
5.4 Análises estatísticas.....	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6.1. Calibração	36
6.2. Correlações entre propriedades eletromagnéticas e propriedades físicas e químicas do solo....	37
6.3. Predições de propriedades físicas indicadoras da compactação.....	50
7. CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população humana mundial culmina em uma demanda cada vez maior por alimento. Estima-se que aproximadamente 735 milhões de pessoas no mundo foram afetadas pela fome no ano de 2022, 122 milhões a mais que em 2019 (WATANABE; FABRIS, 2023). A população humana mundial ultrapassou 8 bilhões de pessoas em 2022, e acredita-se que essa população ultrapassará 8,5 bilhões em 2030, e 9,7 bilhões em 2050 (ONU, 2022). Assim, é imperativo a busca por estratégias para aumentar a produção de alimentos a fim de atender a demanda populacional.

Nesse cenário, temos a modernização da agricultura, buscando maior eficiência no sistema de produção, com a utilização de máquinas cada vez mais pesadas e potentes (PORTELA, 2014). A mecanização agrícola facilita as operações no campo, agilizando e/ou substituindo o trabalho manual e otimizando o tempo, entretanto, o tráfego de máquinas agrícolas de forma excessiva e em condições inadequadas de umidade do solo pode ocasionar graves alterações estruturais neste, sendo assim, uma das principais causas da compactação do solo (HAMZA; ANDERSON, 2005; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; CAMBI *et al.*, 2017).

A compactação do solo pode ser entendida como o processo de compressão do solo não saturado em que há um aumento de sua densidade devido a redução do seu volume total. A compactação resulta na expulsão de ar dos poros, provocando um rearranjo das partículas, que se tornam mais próximas, diminuindo assim, o espaço poroso, tornando o solo mais denso (CURI *et al.*, 1993; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; SOIL SCIENCE GLOSSARY TERMS COMMITTEE, 2008). Esse processo é o principal fator de degradação física dos solos agrícolas (NAWAZ; BOURRIÉ; TROLARD, 2013; KELLER *et al.*, 2019).

O processo de compactação afeta direta ou indiretamente diversas propriedades do solo. Assim, o diagnóstico desta compactação pode ser realizado com base na porosidade, densidade do solo (D_s), resistência do solo à penetração (RP) e condutividade hidráulica (K), entre outros (MANTOVANI, 1987, MARSILI *et al.*, 1998; ISHAQ *et al.*, 2001; MCQUEEN; SHEPHERD, 2002). Essas propriedades podem ser mensuradas diretamente por meio de métodos padrões, por exemplo, para avaliar a porosidade total e D_s , utiliza-se o método do cilindro volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017), enquanto que, para a RP, utiliza-se penetrômetros (BENGHOUGH; MULLINS, 1990) como o penetrômetro de Stolf (STOLF *et al.*, 2014). No entanto, esses métodos padrões são trabalhosos, sobretudo, para análises em profundidade (ROMERO-RUIZ *et al.*, 2018), demandando muito tempo e mão de obra para execução.

A coleta e posterior análise das amostras são as etapas mais intensivas e dispendiosas na avaliação quantitativa de atributos do solo, surgindo assim, a necessidade de utilização de métodos mais práticos e eficientes baseados na agricultura de precisão (MCBRATNEY *et al.*, 2003). Com o avanço das práticas agrícolas voltadas para a agricultura inteligente (*Smart farming*), novas técnicas são requeridas para otimizar os trabalhos de campo.

Neste cenário, têm-se como alternativa, os métodos geofísicos que avaliam variações elétricas do solo, proporcionando uma investigação não invasiva e de alta resolução, em pouco tempo e com baixo custo de mão de obra (REN *et al.*, 2022). Dentre esses métodos geofísicos, o uso de sensores que se baseiam em propriedades eletromagnéticas do solo, como para determinação da resistividade elétrica do solo (ρ), são muito utilizados para diferentes aplicações. Na agricultura, sensores de condutividade e resistividade elétrica vem sendo utilizados para a caracterização dos atributos do solo na agricultura de precisão (ROMERO-RUIZ *et al.*, 2018; KARLEN, 2019; LONGO *et al.*, 2020; SANTOS, 2020; BOTTEGA, 2022; PENTOS; PIECZARKA; SERWATA, 2021), inclusive de forma automática em escala experimental (FENTANES *et al.*, 2018; WADOUX; MCBRACTNEY, 2021).

Nesse sentido, existem no mercado equipamentos fabricados especificamente para esse fim, que são geralmente acoplados ao trator agrícola e permitem avaliação espacial da área com maior agilidade e praticidade. Entretanto, as medições são fixas e realizadas em apenas uma ou duas profundidades de solo, não se adequando a situações diversificadas de aplicação.

Outra propriedade eletromagnética que tem sido utilizada em método alternativo para estimar atributos do solo é a Suscetibilidade magnética (SM). Esta vem se apresentando como boa preditora de propriedades químicas e mineralógicas do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000; SIQUEIRA *et al.*, 2010a; DE SOUZA BAHIA *et al.*, 2017; RAMOS, 2019) e mais recentemente, há registro para predição de RP (PENTOS; PIECZARK; SERWATA, 2021). Comumente, utiliza-se apenas uma das propriedades eletromagnéticas (ρ ou SM) para predizer os atributos do solo, e são poucos os estudos sobre a relação entre essas propriedades e a compactação do solo, havendo, portanto, uma carência de trabalhos acerca desse tema. (PENTOS; PIECZARK; SERWATA, 2021).

2. HIPÓTESES

Este trabalho foi desenvolvido para testar as seguintes hipóteses: i) O uso de propriedades eletromagnéticas do solo aliado a algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) constituem um método eficiente para o diagnóstico da compactação do solo, podendo substituir os métodos padrões; ii) A combinação dos dois parâmetros eletromagnéticos (ρ e SM)

é ainda mais eficiente que a utilização dos parâmetros isoladamente; iii) As propriedades eletromagnéticas do solo se relacionam mais significativamente com os atributos físicos do solo do que com os atributos químicos; iv) A época de avaliação em campo, interfere na correlação entre as propriedades eletromagnéticas e os atributos físicos do solo, sendo amplificado na estação seca. v) A camada de medição de atributos físicos do solo se correlaciona com mais de uma camada de medição de ρ . e, vi) Modelos de predição treinados com algoritmos de aprendizado de máquinas são mais acurados do que modelos lineares.

3. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é diagnosticar a compactação do solo com base em propriedades eletromagnéticas do solo. Os objetivos específicos são: i) Correlacionar propriedades eletromagnéticas do solo com atributos físicos e químicos do solo, relacionados a porosidade e fertilidade, respectivamente; ii) Verificar se as propriedades eletromagnéticas do solo estão mais significativamente relacionadas com atributos químicos ou físicos do solo; iii) Verificar a eficiência da combinação dos parâmetros ρ e SM na predição da compactação do solo; iv) Verificar qual a melhor época para se fazer esse diagnóstico em função da variação sazonal de umidade do solo; v) Verificar em qual profundidade de avaliação ocorre a melhor correlação entre propriedades eletromagnéticas e físicas do solo. vi). Verificar qual método de predição possibilita maior acurácia na estimativa da compactação do solo.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Compactação do solo

Os efeitos negativos da compactação do solo na produtividade das culturas têm aumentado, resultado do uso excessivo de máquinas pesadas, aumento da carga por eixo e operações de campo quando o solo está com umidade inadequada. A compactação do solo em níveis intermediários pode ser benéfica às plantas quando se considera um solo solto e desagregado, sendo benéfica para a semeadura, promovendo um melhor contato semente-solo e rápida emergência, e ainda reduz a taxa de secamento do solo. Entretanto, em níveis elevados, essa compactação pode ser extremamente prejudicial, pois, pode, dentre outros fatores, impedir o crescimento radicular, limitando a absorção de água e nutrientes (BICKI; SIEMENS, 1991; REICHERT, SUZUKI; REINERT, 2007).

A compactação do solo tem potencial de ocorrência em diferentes níveis de profundidades e de maneira desuniforme ao longo do perfil do solo, podendo ser superficial principalmente no sistema de plantio direto, e subsuperficial no plantio convencional, em ambos

os casos haverá reorganização das partículas de solo dificultando as trocas gasosas e a infiltração de água no solo (MOSCOSO, 2021).

O efeito da compactação na planta, tem início na limitação ao desenvolvimento do sistema radicular, com consequências no crescimento da parte aérea e na produtividade. O sistema radicular talvez seja o primeiro componente da planta a sofrer os efeitos da compactação. Um solo pode estar quimicamente adequado, mas, caso ocorra a compactação, as plantas não se beneficiam plenamente dos nutrientes disponíveis, visto que, o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado e é nelas que ocorre a maior taxa de absorção (REICHERT, SUZUKI; REINERT, 2007). Além disso, a compactação afeta a porosidade do solo, e, conseqüentemente, a quantidade de O₂ disponível na rizosfera, podendo ser limitante para os processos metabólicos das plantas (QUEIROZ-VOLTAN; NOGUEIRA; MIRANDA, 2000).

Essa compactação afeta o desenvolvimento das plantas, podendo diminuir em até 75% a produtividade dos cultivos (CORREA *et al.*, 2019), sobretudo pelo impedimento mecânico ao crescimento radicular devido ao aumento da resistência do solo à penetração, resultando assim em menor volume de solo explorado, e, conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes, afetando ainda a difusão de oxigênio e de outros gases, culminando no acúmulo de CO₂ e de fitotoxinas, comprometendo assim, o rendimento das culturas. (MAPFUMO *et al.*, 1998; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; MEROTTO JUNIOR; MUNDSTOCK, 1999; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; ISHAQ *et al.*, 2001; GUIMARÃES; STONE; MOREIRA, 2002; SZATANIK-KLOC *et al.*, 2018; CORREA *et al.*, 2019).

4.2 Diagnóstico da compactação do solo

O diagnóstico do estado de compactação do solo, seja pela RP ou pela Ds, apresenta relação direta com o desenvolvimento radicular, comumente, com o aumento nos valores dessas propriedades, há a redução do crescimento radicular, havendo, portanto, uma relação inversamente proporcional. Deste modo, o potencial de crescimento da planta e as condições físicas do solo determinam a taxa de crescimento radicular (GERARD *et al.*, 1982; VEEN; BOONE, 1990; BOONE; VEEN, 1994)

A dificuldade para a definição, e, conseqüente, adoção de um valor crítico para propriedades do solo advém do fato que esses não são determinantes diretos do crescimento das plantas, diferente da água, do ar, e da temperatura, que influenciam diretamente esse crescimento. Ademais, as propriedades do solo agem de forma conjunta e complexa sobre os fatores de crescimento, e, assim, a definição de um valor específico pode não ter significado,

quando analisado de forma isolada (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003). Outro ponto que dificulta essa definição de um valor crítico, é o de que, solos, culturas, e até mesmo os cultivares dentro de uma espécie respondem de forma diferente aos níveis de compactação do solo. Assim, é muito importante que se tenha alguns cuidados nesse tipo de determinação para que não ocorram erros de interpretação. (GUIMARÃES; STONE; MOREIRA, 2002; BRAIDA, 2004; BEUTLER *et al.*, 2006; FOLONI; LIMA; BUL, 2006; SILVA; MAIA; BIANCHINI, 2006a, SILVA; BARROS; COSTA, 2006b).

4.2.1 Resistência do solo à penetração (RP)

A RP é a resistência que o solo apresenta para a penetração de raízes, e depende de atributos como, umidade, Ds e textura do solo (BUSSCHER, 1990; CANARACHE, 1990; PABIN *et al.*, 1998), ao passo que, um solo mais seco ou mais denso tende a apresentar maiores valores de resistência quando comparado a um solo mais úmido ou menos denso, enquanto, para um mesmo valor de umidade, um solo argiloso tende a apresentar maior resistência que um solo arenoso (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Os valores críticos de RP é um campo em aberto à pesquisa, necessitando assim, de estudos realizados sobretudo no campo, considerando as condições climáticas. (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007), tendo em vista que, a RP não consegue, por exemplo, identificar e integrar o efeito de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo, contudo, são nessas regiões de menores resistências que as raízes tendem a crescer, mesmo em solos com resistência à penetração elevada (SILVA, 2003).

No entanto, na literatura existem autores que apontam valores críticos de resistência do solo à penetração que podem variar de 2 MPa a 4 MPa (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996), sendo os valores próximos a 2 MPa já considerados como impeditivos ao crescimento radicular (CORTEZ *et al.*, 2019), visto que, valores de RP superiores a 2,5 MPa podem resultar em diferentes impactos no crescimento e desenvolvimento das raízes e conseqüentemente das plantas (FERNANDES *et al.*, 2020).

O valor crítico de 2 MPa para RP tem sido amplamente adotado como limitante para o desenvolvimento das plantas cultivadas em geral, o valor de 3,0 MPa para solos sob florestas, 2,5 MPa para áreas com pastagens e 3,5 MPa para solo cultivado em longo prazo, sob plantio direto (ZOU; SANDS; BUCHAN, 2000; LAPEN *et al.*, 2004; LEÃO *et al.*, 2004; TORMENA *et al.*, 2007)

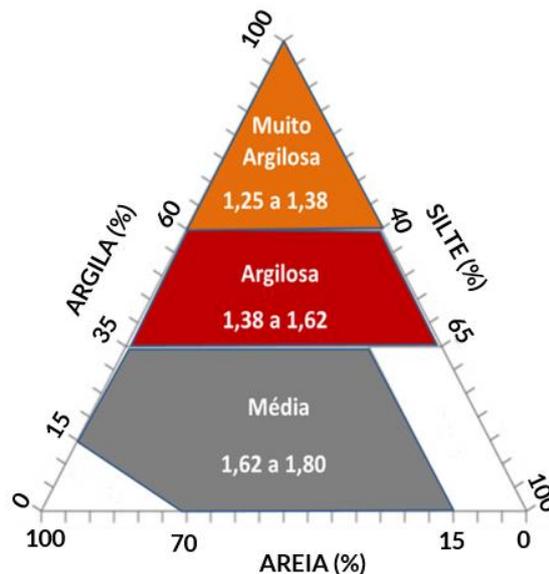
4.2.2 Densidade do solo (Ds)

Em relação as propriedades utilizadas para diagnosticar a compactação do solo, talvez a Ds seja a mais segura, tendo em vista que, apresenta menor ou nenhuma dependência de outros fatores, como a umidade, por exemplo (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

A Ds pode ser entendida como sendo a relação entre a massa de solo seco e o volume total de solo, sendo influenciada pela cobertura vegetal, teor de matéria orgânica e uso e manejo do solo (CORSINI; FERRAUDO, 1999; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000a). O excessivo aumento da densidade do solo culmina na diminuição do volume total de poros, redução da permeabilidade e da infiltração de água, aumento da RP, quebra dos agregados, dentre outros, acarretando prejuízo à qualidade física do solo (SOUZA; CARNEIRO; PAULINO, 2005).

Em relação ao limite crítico, autores como Alvarenga *et al.* (1996) e Corsini e Ferraudo (1999) consideram a faixa de 1,27 a 1,57 g cm⁻³ como restritiva ao crescimento radicular e à infiltração de água no solo, entretanto, esse limite varia inversamente em função do teor de argila no solo, tendo, portanto, uma forte relação com a textura do solo (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996; SEVERIANO *et al.*, 2011). A figura 1 mostra a relação entre a classe textural do solo e esse valor crítico de Ds.

Figura 1 – Limites críticos de Densidade do solo (Ds) de acordo com a classe textural, considerando o IHO=0



Fonte: Adaptado de Severiano *et al.* (2011).

4.2.3 Macroporosidade

Em relação à porosidade, a redução na macroporosidade tem efeito considerável sobre o desenvolvimento do sistema radicular e sobre a velocidade de infiltração de água no solo, por

fornecer ao solo condições de baixa aeração sobretudo em solos argilosos. (CINTRA; MIELNICZUK; SCOPEL, 1983).

O valor crítico de macroporosidade parece estar bem estabelecido, diversos autores consideram o valor de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ como sendo limitante para o crescimento das plantas, pois, limitam o crescimento radicular (BAVER, 1949; VOMOCIL; FLOCKER, 1961; GRABLE; SIEMER, 1968; KIEHL, 1979; GUPTA; ALLMARAS, 1987). Porém, esse valor varia segundo parâmetros como a espécie vegetal e o nível de atividade biológica do solo (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

A porosidade do solo e a D_s são propriedades relacionadas com alterações no volume de solo, assim sendo fortemente relacionadas com a compactação do solo. A D_s apresenta relação inversa com a porosidade, e, geralmente, a redução da porosidade ocorre pela redução dos macroporos (poros maiores que $50 \mu\text{m}$), responsáveis pela aeração do solo e infiltração de água (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

4.3 Propriedades eletromagnéticas do solo

As propriedades eletromagnéticas do solo têm sido exploradas através de diferentes sensores para se obter, de forma expedita, respostas às alterações de outras propriedades do solo como condutividade elétrica, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética. A condutividade elétrica (CE) pode ser entendida como a capacidade de um material em conduzir corrente elétrica, e o solo, devido a sua variabilidade na composição físico-química possui diferentes níveis de CE (MOLIN; RABELLO, 2011).

Essa condução de eletricidade no solo ocorre devido à presença de sais livres na solução e íons trocáveis nas superfícies de partículas minerais sólidas do solo, mais especificamente na fração argila (ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008; SANTOS, 2020). Deste modo, sensores de CE que operam pelo método da Resistividade Elétrica (RE) são capazes de perceber alterações em vários atributos do solo de interesse agrônômico, como a umidade (KURTULUS; YEKEN; DURDAG, 2019) e a textura do solo (SERRANO; SHAHIDIAN; SILVA, 2014; FORTES *et al.*, 2015; SUDDUTH, KITCHEN; DRUMMOND, 2017; MEDEIROS *et al.*, 2018).

A condutividade elétrica relaciona-se com o tamanho das partículas devido à densidade de carga elétrica na superfície dos constituintes sólidos. Em solos argilosos, as cargas elétricas localizadas na superfície das partículas de argila culminam em uma maior condutividade elétrica do que em solos de textura arenosa devido à magnitude da superfície específica

(FUKUE *et al.*, 1999). Essa condutividade geralmente está correlacionada com atributos físicos e químicos do solo (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005; ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008).

A CE pode ser definida como sendo o inverso da RE (RABELLO; BERNARDI; INAMASU, 2014), tendo em vista que, enquanto a condutividade é a facilidade do material em conduzir corrente elétrica, a resistividade é a capacidade desse material em se opor a essa corrente elétrica (SANTOS, 2020), assim, fatores que influenciam na CE são os mesmos que influenciam na RE.

O método da Resistividade Elétrica do Solo (ρ) determina a capacidade do solo em se opor ao fluxo de elétrons originado pelo sensor (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005; ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008). A ρ depende de vários atributos do solo, como estrutura, densidade do solo, porosidade e umidade do solo. (CORWIN; LESCH, 2005; ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008; COSTA *et al.*, 2014; KOWALCZYK; MASLAKOWSKI; TUCHOLKA, 2014; JERABEK; ZUMR; DOSTAL, 2017; ROMERO-RUIZ *et al.*, 2018). Essa ρ relaciona-se com os atributos do solo de diferentes maneiras, estando relacionada inversamente com atributos como Ds, umidade, matéria orgânica, temperatura, concentração de soluto e teor de argila 2:1, e diretamente com atributos como macroporosidade e conteúdo de areia. (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005).

Considerando que o solo é um meio heterogêneo, a ρ mensurada não corresponde unicamente ao valor de uma camada ou profundidade, mas sim, à uma resistividade média do solo, denominada resistividade elétrica aparente (ρ_a), que reflete as propriedades médias do meio pelo qual a corrente passa. (BORGES, 2007).

A SM pode ser definida como sendo a medida da facilidade com que um material se magnetiza quando submetido à um campo magnético (VEROSUB; ROBERTS, 1995), e ocorre no solo devido a rotação e translação dos elétrons constituintes de alguns minerais presentes, e, tendo em vista que os minerais apresentam diferentes características quanto a sua espécie e formato, a SM representa o mineral de maior expressão no ambiente, refletindo assim parte da composição mineralógica do solo (LUQUE, 2008; SOUZA JÚNIOR *et al.*, 2010) Os minerais ferromagnéticos como a magnetita e a maghemita são os principais determinantes da suscetibilidade magnética do solo (AYOUBI; ADMAN, 2019).

Essa atração magnética do solo é uma propriedade que já vem sendo considerada desde os primeiros levantamentos de solos, em que, com o auxílio de um ímã os pesquisadores separavam os solos advindos de rochas máficas dos solos advindos de outros materiais de origem (RESENDE; SANTANA; REZENDE, 1988; RAMOS, 2019). Com o passar dos anos,

essa metodologia para determinação da SM foi sendo adaptada, utilizando-se equipamentos como balança de precisão (DAVIS, 1992), até o desenvolvimento de um equipamento que ficou conhecido como Susceptibilímetro (DEARING, 1999), que se difundiu no meio científico e de pesquisa.

4.4 Propriedades eletromagnéticas e diagnóstico da compactação do solo

Tendo em vista que a compactação do solo pode ser identificada principalmente pela redução da macroporosidade e aumento da D_s , que conforme supracitado, são diretamente e inversamente proporcional a ρ , respectivamente, espera-se que solos compactados apresentem menores valores de ρ em relação a solos não compactados (MELO *et al.*, 2021). Assim, a ρ tem se mostrado promissora para detectar a variabilidade espacial das propriedades físicas do solo, podendo ser utilizada como método indireto para identificação de modificações na estrutura do solo e conseqüentemente no diagnóstico da compactação (JERABEK; ZUMR; DOSTAL, 2017; GARCÍA-TOMILLO *et al.*, 2018; SANTOS, 2020), sendo capaz de prever a variação da produtividade da cultura por causa das diferenças nas propriedades químicas e físicas do solo (JOSHUA; MOKUOLU, 2016).

O método da ρ é um método geofísico, e consiste na utilização de sensores que se baseiam em propriedades eletromagnéticas do solo, sendo muito utilizado para a caracterização dos atributos do solo na agricultura de precisão, e, para as diferentes técnicas de coleta de dados, existem diferentes tipos de arranjos que podem ser adotados de acordo com o objetivo do estudo a ser realizado (SANTOS, 2020).

Para a medição da ρ , geralmente utiliza-se quatro eletrodos: Dois eletrodos em que se injeta a corrente elétrica (A e B), conhecidos como eletrodos de corrente, e outros dois eletrodos que registram a diferença de potencial resultante dessa corrente elétrica aplicada (M e N), conhecidos como eletrodos de potencial (SAMOUELIAN *et al.*, 2005). A corrente elétrica aplicada é do tipo alternada de baixa frequência e, em seguida no equipamento, determina-se a diferença de potencial em dois pontos previamente estabelecidos (SANTOS, 2020).

Um dos entraves relacionados ao uso dessa técnica é a formação de potenciais elétricos indesejáveis, que ocorre em virtude da polarização dos eletrodos provocado pelo contato entre o metal do eletrodo e a solução eletrolítica aquosa do solo. Para minimizar o efeito desse fenômeno, os sensores de ρ precisam aplicar uma corrente elétrica alternada, na faixa de frequência inferior a 100 Hz (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990; HERMAN, 2001; ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008). No entanto, ainda não está claro se há uma

interferência da frequência da corrente elétrica nos valores obtidos pelo sensor e se há uma faixa de frequência mais adequada para ser utilizada para as determinações (SANTOS, 2020).

A ρ varia à medida que se altera o arranjo dos eletrodos ou à medida que se move os eletrodos mesmo sem alterar o arranjo (BORJA, 2018). A movimentação desses eletrodos vai variar de acordo com o arranjo adotado. Dentre esses arranjos, os mais utilizados são os de Schlumberger, Wenner e Dipolo-dipolo (ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008; BORJA, 2018).

O arranjo Schlumberger é simétrico, com dois eletrodos de corrente elétrica bem espaçados, posicionados nas extremidades, e dois eletrodos de potencial posicionados internamente no arranjo. Os eletrodos de corrente elétrica (A e B) apresentam um maior fator de espaçamento que o espaçamento entre os eletrodos de potencial (M e N), podendo ser afastados por grandes distâncias (de até quilômetros), enquanto o espaçamento entre os eletrodos de potencial permanece constante (Figura 2). Esta característica faz com que esse arranjo seja um dos melhores arranjos disponíveis para a determinação da ρ em camadas de solo em profundidades maiores (REYNOLDS, 1997; ASPINALL; GAFFNEY, 2001; ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008).

O arranjo do tipo Schlumberger é massivamente referenciado na literatura, sendo o mais utilizado para a realização de sondagens elétricas. Neste arranjo, os quatro eletrodos são dispostos simetricamente em relação ao ponto médio (Figura 2) (BORJA, 2018).

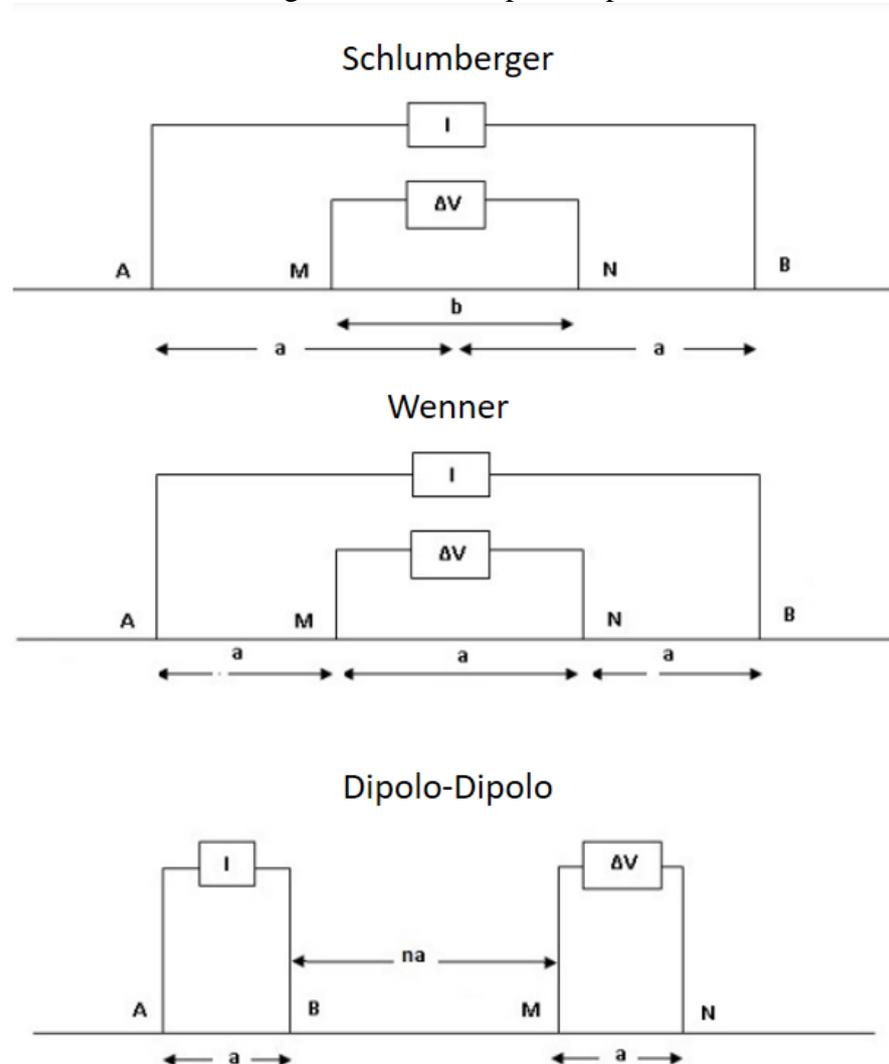
O arranjo do tipo Wenner, apresenta uma configuração de eletrodos básica e bem estabelecida na literatura, semelhantemente ao arranjo Schlumberger, a corrente elétrica é injetada pelos eletrodos A e B, enquanto a diferença de potencial elétrico entre os eletrodos M e N é mensurada, no entanto, diferente do arranjo Schlumberger, nesse tipo de arranjo, os eletrodos utilizados são espaçados da mesma distância (Figura 2) (BORJA, 2018).

Já o arranjo dipolo-dipolo, diferentemente dos outros dois tipos de arranjos apresentados, é caracterizado por uma separação relativamente grande entre o par de eletrodos de corrente, localizados em uma das extremidades do arranjo, e o par de eletrodos de potencial, localizados na outra extremidade (Figura 2). Este tipo de arranjo é muito utilizado tanto no mapeamento da ρ do solo, quanto na determinação da ρ para diferentes profundidades (REYNOLDS, 1997; SAMOUËLIAN *et al.*, 2004; ALLRED *et al.*, 2008).

Esse arranjo também é muito indicado para avaliação de perfil de solo, avaliando tanto na vertical, quanto na horizontal, o que é mais difícil de ocorrer com a adoção dos outros tipos de arranjos. Assim sendo, para medir a ρ em diferentes profundidades, o ponto médio da matriz do sensor se mantém fixo no mesmo local e o par de eletrodos de corrente elétrica e de potencial

são aproximados ou afastados, dependendo da profundidade de alcance desejada (ALLRED; DANIELS; EHSANI, 2008).

Figura 2 – Representação da disposição dos eletrodos nos arranjos Schlumberger, Wenner e Dipolo-Dipolo



Fonte: Amarante (2014).

A SM, assim como a ρ , está relacionada com atributos do solo. Autores como Siqueira *et al.* (2010a) encontraram correlações significativas entre a SM e o teor de argila, a CTC, a capacidade de adsorção de fósforo e o teor de óxidos de ferro como hematita; outros autores como Maher (1998) e Grimley, Arruda e Bramstedt (2004), pontuam também a relação com a drenagem do solo, teor de matéria orgânica e de carbono orgânico, e de acordo com Ayoubi e Adman (2019), apresenta ainda, forte relação com as concentrações de elementos como cromo, ferro, zinco, cobalto, níquel e manganês. Existem poucos estudos sobre a relação entre a SM e os atributos físicos e a compactação do solo, no entanto, há um indício de uma forte relação entre essa SM e a RP, apresentado em estudo realizado por Pentos; Pieczarka; Serwata (2021),

porém, esses autores não apresentaram uma justificativa plausível acerca dessa relação, que ocorreu em condições de clima temperado, deste modo, surge a importância de se avaliar essa relação em condições de clima tropical, como o Brasil.

4.5 Equipamentos móveis de avaliação de propriedades eletromagnéticas do solo

Existem no mercado, alguns equipamentos móveis, em forma de implementos agrícolas que já vem sendo muito utilizados acoplados a tratores agrícolas para leitura da ρ , em que os eletrodos são substituídos por sensores acoplados nos discos desses implementos, de injeção e de leitura da corrente elétrica. Como exemplo, temos o *Veris 3100* que é um dos equipamentos mais conhecidos para esse fim (RABELLO *et al.*, 2008), sendo fabricado pela *Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas*, e o *Terram*, da *Falker Automação Agrícola LTDA* (BOTTEGA *et al.*, 2022). Ambos equipamentos trabalham com o arranjo Wenner, de acordo com informações dos fabricantes.

O *Veris 3100* é composto basicamente por um chassi, em que são montados seis discos, de modo a obter leituras das camadas de 0 – 30 e 0 – 90 cm de profundidade. São adicionados pesos ao chassi para garantir o corte da palhada e o contato dos discos com o solo. Esse equipamento é acoplado ao trator agrícola (Figura 4) e as leituras são obtidas por meio da emissão de uma corrente elétrica pelos dois discos intermediários, ao passo que, os dois discos externos e os dois internos detectam a diferença de potencial que ocorre no campo eletromagnético formado no solo e resultante da corrente elétrica aplicada. Os dois discos internos integram a resistência entre as profundidades de 0 e 30 cm, enquanto os dois externos integram a resistência entre 0 e 90 cm (MACHADO *et al.*, 2006; PERALTA *et al.*, 2013; BOTTEGA *et al.*, 2022).

Figura 3 – Equipamento Veris 3100 – Stara, vista frontal (A) e vista traseira (B)



Fonte: AGROADS (2023).

Figura 4 - Equipamento Veris 3100 acoplado ao trator agrícola



Fonte: Stara (2021).

Já o Terram (Figura 5a) trata-se de um equipamento constituído basicamente por um chassi onde são montados quatro discos espaçados igualmente em 0,25 metros e são adicionados pesos a esse chassi para assegurar o corte da palhada e o contato dos discos com o solo. Os discos internos servem como eletrodos potenciais e os externos como eletrodos de corrente. Obtêm-se a ρ medida pela diferença de potencial entre a corrente emitida e a recebida. Os dados coletados são gravados no sistema *Fieldbox* (Figura 5b), de fabricação desta mesma empresa, esse equipamento pode ser acoplado ao trator (Figura 6) ou até mesmo à um quadriciclo ou algum outro veículo (BOTTEGA *et al*, 2022).

Figura 5 – Equipamento Terram – Falcker (A) e Sistema Fieldbox (B)



A



B

Fonte: Bottega *et al* (2022).

Figura 6 - Equipamento Terram acoplado a um trator agrícola



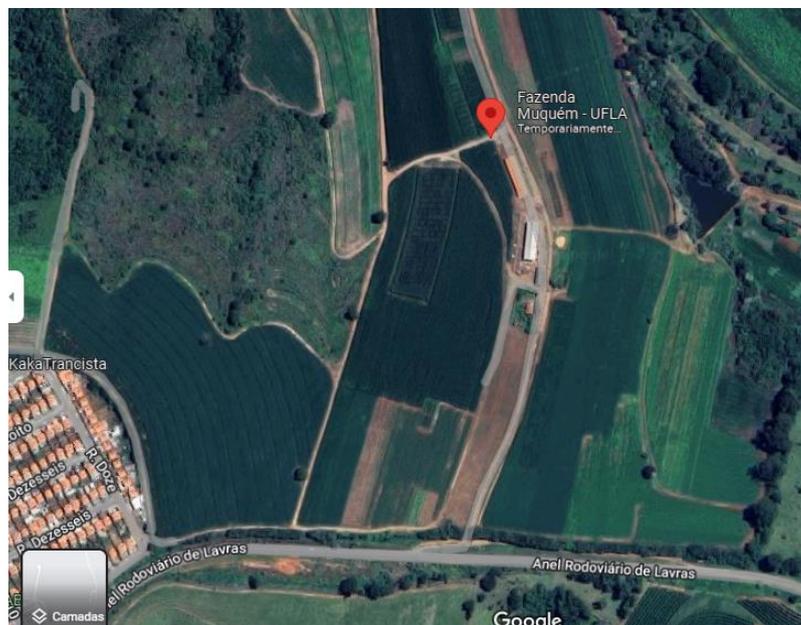
Fonte: Falcker (2023)

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido na Fazenda Experimental Muquém, pertencente à Universidade Federal de Lavras - UFLA, município de Lavras – MG, a uma altitude de 910 m, com coordenadas geográficas 21°12'14" S, 44°58'42" W (Figura 7). O clima é definido como Cwa de acordo com a classificação de Köppen, temperado chuvoso (mesotérmico) com inverno seco e verão quente (KOTTEK *et al.*, 2006; ALVARES *et al.*, 2013).

Figura 7 – Localização da área experimental



Fonte: *Google Maps* (2022).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico típico de textura argilosa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018). A média de distribuição de argila, silte e areia no perfil do solo da área experimental é de 530, 250 e 220 g kg⁻¹, respectivamente, de acordo com análise textural pelo método da pipeta (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Na área é adotado o sistema de plantio direto há cerca de 10 anos, com cultivo de plantas anuais, havendo uma rotação entre plantas leguminosas (soja ou feijão) e gramíneas (milho e sorgo), sob condições de sequeiro. O experimento foi instalado na safra de verão de 2021/2022.

5.2 Delineamento experimental

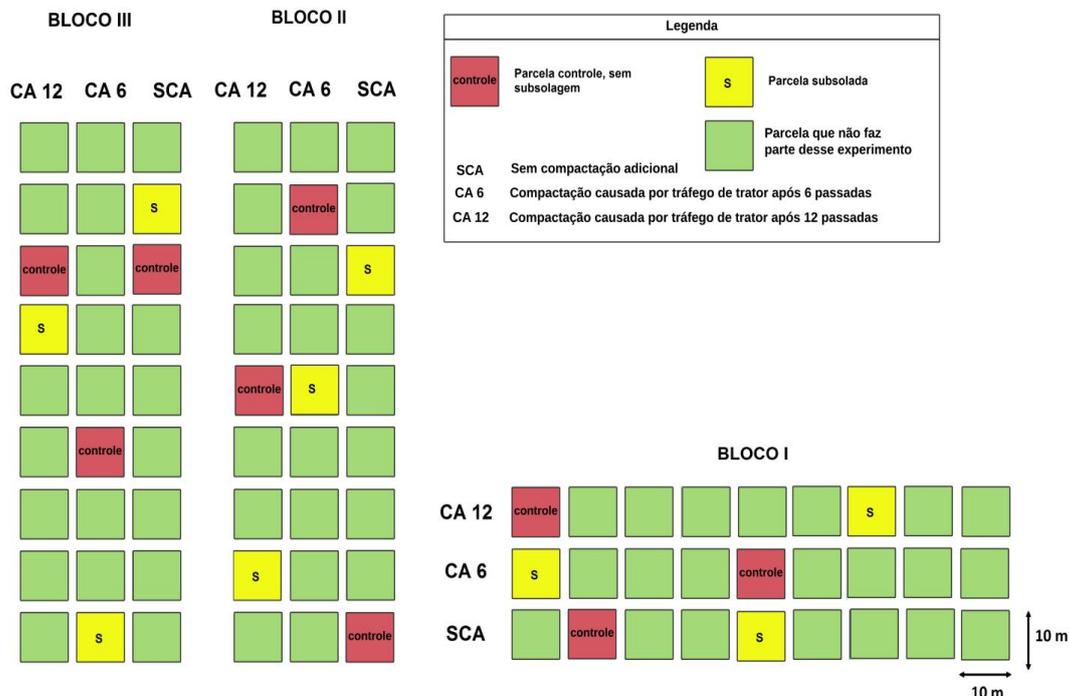
O delineamento experimental foi em blocos casualizados com 3 repetições, em esquema fatorial 3x2 (3 níveis de compactação e 2 manejos). Na instalação do experimento, cada um dos

três blocos, com 30m x 90m de dimensão, foi dividido em 3 faixas de igual tamanho (10mx90m) com diferentes níveis de compactação recebidos aleatoriamente em cada bloco. Estas foram subdivididas em 9 parcelas de 10mx10m as quais receberam diferentes manejos do solo, entretanto, para fins desse estudo, foram consideradas apenas duas dessas parcelas (Figura 8).

Os níveis de compactação foram obtidos por meio de compactação adicional utilizando-se um trator de 6 toneladas, com umidade do solo próxima a umidade na capacidade de campo, da seguinte forma: Sem compactação adicional (SCA), em que não houve compactação adicional com o trator; Compactação adicional com 6 passadas (ida e volta) do trator (CA6); Compactação adicional com 12 passadas do trator (CA12).

Quanto ao segundo fator a se analisar, o manejo do solo, foram considerados nesse estudo: i) A parcela onde houve a descompactação mecânica do solo com o subsolador (S), após a compactação, em que o subsolador utilizado foi da marca Stara modelo Laser KS com 5 hastes do tipo curva, com espaçamento entre hastes de 38cm, e profundidade de trabalho de 45 cm, e ii). A parcela onde não houve descompactação, o controle (C), sendo, portanto, o local compactado nas parcelas com CA6 e CA12 e também na SCA.

Figura 8 - Croqui da área experimental com disposição dos dois fatores de estudo, nível de compactação e manejo do solo, nos três blocos.



Fonte: Do autor (2022).

5.3 Coletas e Avaliações

As coletas de amostras indeformadas (5.3.1) e deformadas (5.3.2) ocorreram em agosto/2022, já as leituras de ρ (5.3.3) e os ensaios de RP (5.3.4) ocorreram em três épocas, com diferentes condições de umidade do solo, tendo em vista que a umidade é um fator que influencia muito nessas análises (NADERI-BOLDAJI *et al.*, 2014). A primeira ocorreu em agosto/2022, com umidade em torno de 21%, a segunda ocorreu em novembro/2022, com umidade em torno de 28-29% e a terceira ocorreu em Abril/2023, com umidade em torno de 31%.

5.3.1 Amostras indeformadas

Foram coletadas amostras de solo indeformadas, buscando preservar ao máximo a estrutura do solo, para tanto, foram utilizados cilindros volumétricos de metal com volume conhecido para determinação das propriedades físicas D_s , M_a e Capacidade de água Disponível (CAD), e também foram coletadas amostras indeformadas para calibração em laboratório, para tanto utilizou-se cilindros volumétricos em policloreto de vinila (PVC).

Os cilindros volumétricos utilizados apresentam pequenas variações em suas dimensões e peso, devido a isso, foram tomadas, previamente, todas as medidas de todos os cilindros (altura, diâmetro interno) e também os respectivos pesos em balança eletrônica com duas casas decimais, os cilindros de pvc apresentam alturas e diâmetros médios de aproximadamente 7 e 10cm., enquanto os cilindros de metal são menores e apresentam alturas e diâmetros de 2,5 e 6,3cm. aproximadamente.

Para a coleta dos cilindros de metal foi utilizado o amostrador do tipo Uhland, os cilindros foram coletados em 3 profundidades, 0-10cm, 10-20cm e 20-30cm, as coletas ocorreram no centro dos tratamentos S e C em ambos os blocos, totalizando 54 cilindros, devidamente numerados e identificados. Já os cilindros de pvc, foram coletados nos mesmos locais, com um amostrador próprio, porém, apenas na profundidade de 0-10cm, totalizando 18 cilindros.

Após a coleta, as amostras foram envoltas em plástico filme e levadas ao laboratório de física do solo da UFLA para posterior análises. No laboratório essas amostras foram devidamente preparadas (toalete), retirando-se o excesso de solo de modo que o volume de solo corresponda ao volume do cilindro, após isso, colocou-se uma gaze na base inferior prendendo-a com um anel elástico na lateral do cilindro. Feito isso, as amostras foram colocadas em uma

bandeja contendo água destilada até aproximadamente 1/3 da altura do anel, para acontecer o processo de saturação dessas amostras (Todos os poros preenchidos com água).

Importante destacar que o lado do cilindro com gaze, deve sempre ficar para baixo para que a saturação ocorra por capilaridade. Esse processo de saturação leva cerca de 24 horas para os cilindros de metal, e cerca de 72h para os cilindros de pvc (MELO et al, 2021), mas pode variar a depender de cada tipo de solo, de suas propriedades e condições de uso. Dizemos que o solo está saturado quando é possível visualizar uma fina camada de água na parte superior dos cilindros, verificada pelo brilho da água na superfície da amostra (TEIXEIRA et al, 2017).

Após a saturação, as amostras dos cilindros de metal foram utilizadas para análises das propriedades físicas do solo como Densidade do solo (D_s), porosidade (Porosidade total, macroporosidade e microporosidade) conforme preconiza a metodologia padrão do Manual de métodos de análise de solo para cada uma dessas análises (TEIXEIRA et al, 2017).

Após a saturação, foram obtidos os pesos saturados de todas as amostras, que após isso, foram levadas para as tensões de 6, 10, 100 e 1500 KPa, sequencialmente, feito isso, essas amostras foram saturadas novamente, submetidas a tensão de 100KPa e passaram pelo teste de resistência do solo à penetração em laboratório, utilizando um penetrômetro de bancada, e posteriormente foram levadas para estufa de circulação forçada (105 a 110°C) por cerca de 24h, e finalmente foi obtido o peso seco.

Importante pontuar que também foi obtido o peso do elástico e da gaze utilizada em cada cilindro, em relação a gaze, foi obtido tanto o peso seco (após sair da estufa) quanto o peso saturado (após imersão da gaze em água destilada), de posse desses dados foram realizados os cálculos para a densidade do solo (D_s) (equação (1)) e a porosidade (P_t , M_a e M_i), (equações (2), (3) e (4), respectivamente), conforme preconiza o manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA et al, 2017).

A D_s foi calculada pela seguinte equação:

$$D_s = \frac{m_s}{V} \quad (1)$$

Em que:

D_s – Densidade do solo, em $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ (equivalente a $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

M_s – Massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g.

V – Volume do cilindro, em cm^3 .

A P_t foi calculada pela seguinte equação:

$$P_t = \frac{[(a-b)-(c-d)]}{e} \quad (2)$$

Em que:

P_t – Porosidade total, em $m^3 m^{-3}$.

a – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado, em kg.

b – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg.

c – massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado, em kg.

d – massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg.

e – volume total da amostra, em m^3 . Nesse caso, assume-se que o volume total da amostra é igual ao volume do cilindro.

A M_a foi calculada pela seguinte equação:

$$M_a = P_t - M_i \quad (3)$$

Em que:

M_a – macroporosidade, em $m^3 m^{-3}$.

P_t – porosidade total, em $m^3 m^{-3}$.

M_i – microporosidade, em $m^3 m^{-3}$

A M_i foi calculada pela seguinte equação:

$$M_i = \frac{(a-b)}{c} \quad (4)$$

Em que:

M_i – Microporosidade, em $m^3 m^{-3}$.

a – massa do solo seco + água retida, após equilíbrio com um potencial de 6 kPa (60 cm de coluna de água), em g.

b – massa do solo seco a 105 °C, em g.

c – volume total da amostra, em cm^3 (nesse caso, assume-se que o volume total da amostra é igual ao volume do cilindro).

Já os cilindros de pvc, após saturação, iniciou-se a calibração, com as leituras de resistividade com o resistivímetro X5xtal 250 acoplado a uma bateria e a dois multímetros digitais da marca Hikari modelo HM 2090. As leituras se iniciaram com as amostras saturadas, realizando-se as leituras de ρ simultaneamente a pesagem das amostras, onde pesou-se as amostras, para se obter a umidade do solo no momento da análise (MELO *et al.*, 2021), as amostras foram armazenadas em uma bandeja vazia em secagem ao ar, no laboratório, e diariamente foram realizadas as leituras de ρ e tomadas as massas das amostras, durante um período de 25 dias, após isso, as amostras foram secas em estufa a 105-110°C por cerca de 48h para se obter a massa seca dessas amostras.

O ensaio foi realizado de acordo com arranjo Wenner (SAMOUËLIAN *et al.*, 2005), com quatro eletrodos (A, M, N e B), com espaçamento de 0,019m. entre si, inseridos nas amostras à uma profundidade de penetração de 0,05 m (MELO *et al.*, 2021) e fixados em um suporte de plástico acoplado aos cilindros volumétricos. A ρ foi calculada de acordo com a equação (5), proposta por MELO *et al.* (2021):

$$\rho = \frac{4\pi a}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}\right)} \frac{\Delta V}{I} \quad (5)$$

Em que, a é a separação dos eletrodos (m); b é a profundidade de penetração, em metros (m); ΔV é a diferença de potencial devido à aplicação de corrente elétrica, em milivolts (mV); e I é a corrente elétrica injetada, em miliamperes (mA) (MELO *et al.*, 2021).

5.3.2 Amostras deformadas

Simultaneamente, nos mesmos locais e profundidades de coleta das amostras indeformadas, foram coletadas amostras deformadas de aproximadamente 5,200kg de solo, essas amostras foram armazenadas em sacos plásticos devidamente identificados e levadas ao laboratório para posteriores análises.

Dessas amostras foram realizadas as análises químicas, para determinação da fertilidade básica (macro e micronutrientes), CTC, e matéria orgânica, de acordo com as metodologias padrões do manual de métodos de análise de solo (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Ainda dessas amostras, foram retiradas cerca de 10g para análise da suscetibilidade magnética, pelo método do susceptibilímetro (Figura 9), e todo o procedimento ocorreu conforme preconiza o método, as amostras foram colocadas em pequenos tubos transparentes e específicos, que foram posicionados no equipamento, que foi previamente regulado para realizar as leituras, e de forma instantânea, o equipamento forneceu os resultados.

Figura 9 – Susceptibilímetro



Fonte: AlphaGeofísica (2017)

E foram utilizadas cerca de 5kg para o ensaio de proctor normal, que consistiu em compactar corpos de provas com amostras de solo em diferentes condições de umidades (que foram sendo atingidas à medida que se adicionava água as amostras). A compactação dos corpos de prova ocorreu em três camadas, que receberam 25 golpes do martelo usado no ensaio de Proctor normal (STANCATI; NOGUEIRA; VILAR, 1981), determinando-se posteriormente, a densidade do solo. Para cada corpo de prova, uma subamostra de solo foi coletada para a determinação da umidade. De posse dos dados de umidade e da densidade do solo, plotaram-se os pontos, obtendo-se por meio do software Excel, as equações de regressão com os pontos determinados. No ponto máximo da função obteve-se a densidade do solo máxima (D_{smax}) e a umidade ótima (U_{ot}) de compactação (SILVEIRA *et al.*, 2023). Por fim, obteve-se os diferentes graus de compactação pela divisão dos valores de densidade do solo (obtidos pelo método padrão do cilindro volumétrico) pelos valores da densidade máxima obtido neste ensaio de Proctor normal, multiplicados por 100, para sair em porcentagem (SILVEIRA *et al.*, 2023).

5.3.3 Resistividade Elétrica do solo (ρ)

A ρ foi determinada com o resistímetro da Alta Energia modelo X5xtal 250 e dois multímetros digitais da marca Hikari modelo HM 2090 (Figura 10), e o arranjo adotado foi o de Schlumberger, onde os eletrodos serão dispostos conforme representado na figura 13, os eletrodos representados pelos pontos A e B foram os eletrodos de corrente elétrica, ou seja, nestes pontos ocorreu a injeção da corrente elétrica (I), enquanto os eletrodos representados pelos pontos M e N foram os eletrodos que fizeram as leituras de diferença de potencial (ΔV) obtida por essa corrente elétrica que foi injetada ao solo, os eletrodos M e N se mantiveram fixos, enquanto os eletrodos A e B foram móveis, e foi essa movimentação entre eles que indicou a maior ou menor profundidade de leitura.

Figura 10 – Resistivímetro e multímetros utilizados



Fonte: Do autor (2022).

Esse procedimento que envolve o deslocamento desses eletrodos de corrente em relação a um ponto central é chamado de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e permite que se conheça a distribuição da resistividade em profundidade. Se os pontos de injeção de corrente elétrica A e B estão muito próximos (Pequena distância entre AB), a corrente fluirá em subsuperfície alcançando pouca profundidade no perfil do solo, produzindo assim, uma resposta, em termos de ΔV , que será influenciada basicamente pelo material superficial, em contrapartida, à medida que se aumenta a distância entre esses eletrodos, obtêm-se a resposta elétrica em profundidade. A profundidade a ser alcançada pode ser estimada empiricamente como sendo 1/10 a 1/3 do valor da distância AB (LUIZ; SILVA, 1983).

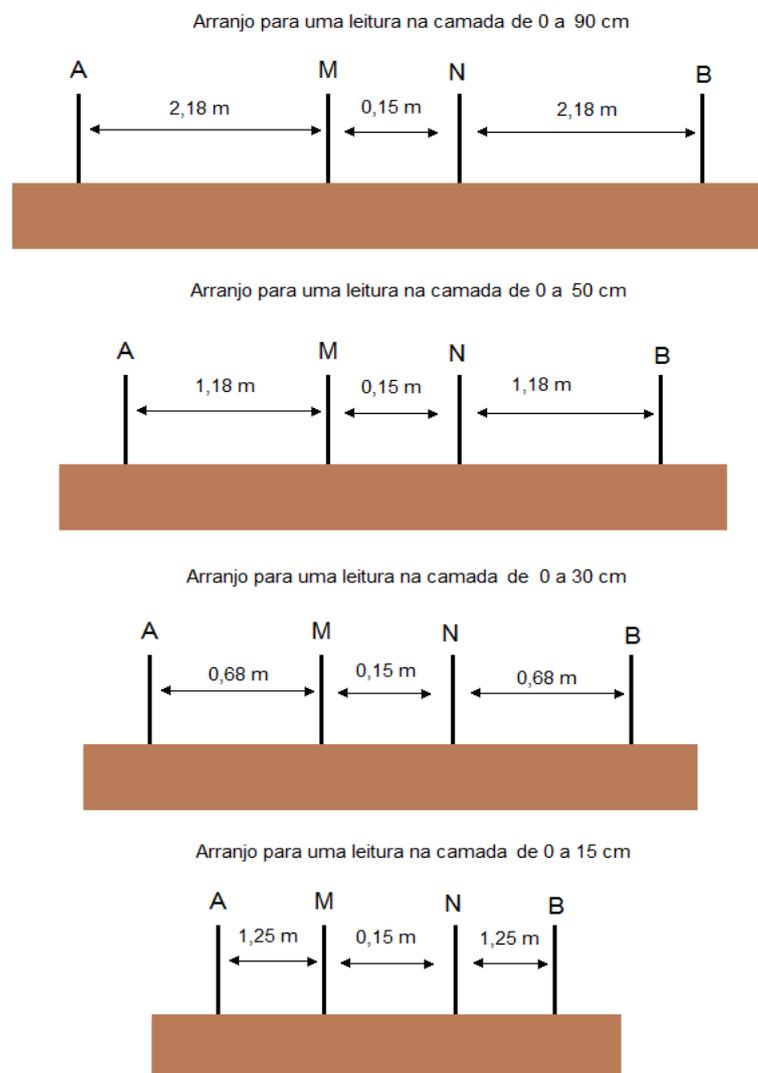
O primeiro passo para a coleta de dados em campo foi a definição das profundidades a serem avaliadas, para este estudo adotamos as profundidades de 0,15, 0,30, 0,50 e 0,90m que foram definidas com base em profundidades adotadas por equipamentos comerciais e por alguns estudos sobre esse tema, em que as profundidades de 0,30 e 0,90m são as profundidades fixas geralmente utilizadas pelos equipamentos móveis comerciais, e as profundidades de 0,15 e de 0,50, são profundidades diferentes, com poucos estudos e informações sobre, que iremos avaliar.

Com base nessas profundidades, definiu-se os espaçamentos AB, tendo em vista que a profundidade corresponde a aproximadamente 20% desse espaçamento, temos que este, pode ser calculado pela relação: Profundidade/0,2. Com isso, tem-se que os espaçamentos AB serão

de 0,75; 1,5; 2,5 e 4,5 equivalentes respectivamente às profundidades de 0,15, 0,30, 0,50 e 0,90m.

E o terceiro passo foi a definição do espaçamento MN, que deve corresponder a no máximo o espaçamento AB/5. Tendo em vista que esse espaçamento MN é fixo, para calcular esse espaçamento, deve-se considerar o menor espaçamento AB, que equivale a menor profundidade de leitura, como o menor espaçamento é de 0,75m, o espaçamento MN será de: $0,75/5 = 0,15\text{m}$. A figura 11 ilustra como foi a disposição do arranjo para leitura em cada uma das profundidades.

Figura 11 – Disposição dos eletrodos para leituras em diferentes profundidades

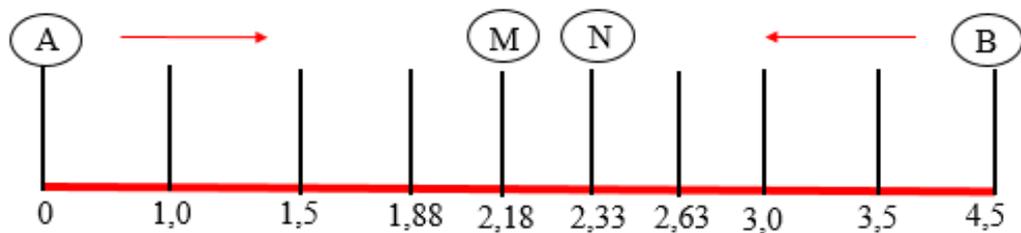


Fonte: Do autor (2022).

O transecto foi de 4,5m de comprimento e foi montado ao centro dos tratamentos, com o auxílio de uma trena, onde foram devidamente demarcados os locais a serem posicionados os eletrodos. Atentou-se para o fato de não posicionar os eletrodos em trincheiras, buracos ou

locais com qualquer alteração humana da estrutura do solo, pois isso poderia interferir significativamente nos resultados. Inicialmente, foi realizada a leitura nos pontos correspondentes a maior profundidade (0,90m.), utilizando os eletrodos equivalentes aos pontos A e B, posicionados nas extremidades do transecto, e posteriormente ocorreram as leituras nos eletrodos no sentido da extremidade ao centro, até chegar nos eletrodos A e B mais centralizados, que são os eletrodos correspondentes a menor profundidade de leitura (0,15m), os eletrodos M e N permaneceram fixos mesmo com a mudança de leitura dos eletrodos A e B. (Figura 12).

Figura 12 – Transecto com a disposição dos eletrodos, as setas vermelhas indicam o sentido das leituras dos eletrodos A e B, das maiores para as menores profundidades de leitura



Fonte: Do autor (2022).

Após o posicionamento do transecto e dos eletrodos, iniciou-se as leituras. O resistivímetro foi acoplado a uma bateria móvel, e os multímetros foram acoplados ao resistivímetro em local adequado, um dos multímetros realizou a leitura da corrente elétrica aplicada (em mA) e o outro realizou a leitura da resistência apresentada pelo solo (em mV) (Figura 13).

Figura 13 – Realização das leituras da ρ



Fonte: Do autor (2022).

Os eletrodos responsáveis pela leitura da corrente elétrica (I) foram acoplados ao multímetro específico por meio de cabos com prendedores nas pontas, e os eletrodos responsáveis pela leitura da resistência foram acoplados ao multímetro de leitura de resistência, em que este, realizou duas leituras, a leitura inicial que corresponde a resistência que o solo apresenta com a corrente natural, sem aplicação de corrente elétrica externa (SP), e a leitura da resistência obtida após a aplicação da corrente (V), essa corrente aplicada depende de cada ponto, e foi aplicada até se observar que o valor observado no multímetro tenha se estabilizado, o que levou alguns segundos. Esses dados foram anotados em uma tabela elaborada previamente e levada à campo (Figura 14).

Figura 14 – Parte da tabela que será levada à campo para anotação dos dados de SP, V e I

Bloco	Faixa	Trat.	A	M	N	B	MN	AB	Prof.	SP (mV)	V (mV)	I (mA)
B1	SCA	S	0	2,18	2,33	4,5	0,15	4,5	0,9			
			1	2,18	2,33	3,5	0,15	2,5	0,5			
			1,5	2,18	2,33	3	0,15	1,5	0,3			
			1,88	2,18	2,33	2,63	0,15	0,75	0,15			
B1	SCA	C	0	2,18	2,33	4,5	0,15	4,5	0,9			
			1	2,18	2,33	3,5	0,15	2,5	0,5			
			1,5	2,18	2,33	3	0,15	1,5	0,3			
			1,88	2,18	2,33	2,63	0,15	0,75	0,15			

Fonte: Do autor (2022).

Em relação ao processamento dos dados, após a coleta desses dados à campo, estes foram digitados em uma planilha específica no excel, e a partir disso, foi calculado de fato a ρ , que pode ser representada pela seguinte equação (6):

$$\rho = K \cdot \Delta V / I \quad (6)$$

Em que:

K: Coeficiente geométrico, depende do arranjo dos eletrodos

ΔV : Diferença de potencial (SP-V)

I: Corrente elétrica

Inicialmente foi calculado o fator K, que é um coeficiente geométrico e depende do arranjo adotado e da disposição dos eletrodos (SAMOUELIAN *et al*, 2005). Para este estudo, foi adotada a seguinte equação (7):

$$K = \pi \cdot ((b \cdot (b+a))/a) \quad (7)$$

Em que:

b: Espaçamento AM ou BN

a: Espaçamento MN

Após isso foi calculada a resistividade pela equação (1), apresentada anteriormente.

5.3.4 Resistência do solo à Penetração (RP)

Simultaneamente com a ρ , foi realizado o ensaio de resistência do solo à penetração (RP), pelo índice de cone, com o penetrômetro dinâmico de impacto Stolf (STOLF *et al.*, 2014) atingindo até a profundidade de 60 cm, sendo realizado em 6 pontos diferentes ao centro de cada tratamento (C e S), seguindo as recomendações descritas por Stolf, Fernandes e Furlani Neto (1983). Os dados obtidos por meio deste equipamento, foram obtidos por esforço manual, visto que, a ponta cônica e a haste do equipamento são inseridas no solo por meio da força do operador ao liberar o peso que provoca o impacto.

As leituras foram realizadas na própria haste, graduada em centímetros (cm) (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983) e os valores foram anotados em planilhas específicas que foram levadas à campo. Para o processamento dos dados obtidos em campo, foi utilizado o programa computacional de dados em excel-vba, em que a linguagem de programação é a Visual Basic Application (VBA) e a interface é o Excel, ambos da Microsoft (STOLF *et al.*, 2014).

O programa em excel-vba é composto de 4 planilhas, sendo 3 operacionais e uma de ajuda. A planilha 1 serve para a entrada dos dados obtidos em campo (nº de impactos e profundidade) tendo como saída a profundidade da camada de solo penetrada e a resistência à penetração correspondente nas unidades: impactos/dm, kgf/cm² e MPa. Também são gerados automaticamente os gráficos correspondentes aos pontos analisados. A planilha 2 realiza a padronização dos intervalos de profundidade e a planilha 3 é uma planilha de entrada rápida, e serve para facilitar o processamento dos dados, pois permite a entrada dos dados em apenas duas colunas. (STOLF *et al.*, 2014).

Juntamente com as leituras de RP, foram coletadas amostras deformadas nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60cm. com o auxílio de um trado holandês, para determinação da umidade do solo atual, essas amostras foram armazenadas em pequenas latas devidamente identificadas, que foram levadas ao laboratório para proceder com a análise, onde foi obtido o

peso úmido e, após secagem em estufa, peso seco, e com base nisso, foi calculada a umidade (CLAESSEN, 1997), que foi utilizada para interpretação dos dados da RP.

5.4 Análises estatísticas

Em relação aos dados da calibração, ajustou-se um modelo linear da relação conteúdo volumétrico de água e ρ considerando diferentes graus de compactação que foram obtidos com o ensaio de proctor normal (87, 90 e 92%), para cada grau de compactação foi ajustado um modelo da relação conteúdo volumétrico de água (cvagua) e ρ utilizando o excel.

Foram plotados gráficos do cvagua em função da profundidade, assim como da RP em profundidade.

Foram realizadas correlações de Pearson entre as propriedades eletromagnéticas e os atributos físicos do solo para verificar como os dados estavam se comportando, em que o coeficiente de correlação assume valores de -1 a 1, quanto mais próximo de 1, mais significativa é a correlação e de forma positiva, o mesmo acontece para valores mais próximos a -1, mas nesse caso, a correlação se dá de forma negativa, e quanto mais próximo de 0, mais fraca é essa correlação. Encontrou-se os p valores para verificar se as correlações foram significativas, foram consideradas significativas quando apresentaram p valor inferior a 0,05, tudo isso, foi realizado no Rstudio, utilizando-se os pacotes corrplot, RColorBrewer e Hmisc. A partir disso, aplicou-se a inteligência artificial.

Os dados foram processados utilizando o software Rstudio, sendo testados 4 modelos de predição: Modelo linear, modelo linear generalizado, Random forest e Random forest categórico, sendo esses dois últimos, modelos com base na inteligência artificial (IA), utilizando o *Machine learning* (Aprendizado de máquina).

Para o modelo linear, verificou-se a relação entre uma propriedade eletromagnética (p ou SM) e os atributos físicos. Para esse primeiro modelo, a escolha da propriedade eletromagnética a ser testada como dado de entrada para predizer cada um dos atributos físicos avaliados, teve como base as correlações de Pearson, assim, a ρ foi utilizada para predizer a RP, e a SM foi utilizada para predizer os demais atributos. Já nos outros modelos, testou-se a combinação dessas propriedades (p e SM) e ainda se adicionou os dados de entrada auxiliares (análise química do solo), buscando potencializar essa predição, e no RF categórico, também considerou como variáveis explanatórias a época, o tratamento de compactação (SCA, CA6 e CA12) e o tratamento de descompactação (Controle e Subsulado).

Para avaliar a qualidade dos modelos, utilizou-se três métricas, o coeficiente de determinação (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (equação (8)) e o erro absoluto

médio (MAE), (Equação (9)), quanto maior o valor de R^2 e quanto menores os valores do RMSE e do MAE, melhor o ajuste do modelo. De acordo com Andrade *et al.*, (2022), as equações do RSME e do MAE são:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - m_i)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - m_i| \quad (9)$$

em que, n: número de observações, y_i : valor estimado pelo modelo e m_i : valor do atributo físico medido pelo método padrão.

Além da predição numérica das propriedades físicas do solo relacionadas com a compactação, testou-se a predição categórica, para afirmar se o solo está ou não está compactado. O atributo considerado para afirmar se o solo estava ou não compactado foi a macroporosidade, sendo que o solo foi considerado compactado, quando apresentou valores de macroporosidade inferiores a $0,10\text{m}^3\text{m}^{-3}$ (REICHERT; REINERT; BARIDA, 2003).

A D_s não foi considerada, tendo em vista, que, todos os valores de D_s foram inferiores ao limite crítico, calculado pela equação com base na textura do solo proposta por Severiano *et al* (2011), a RP também não foi considerada, tendo em vista que, o limite crítico de 2Mpa amplamente apresentado pela literatura (TORMENA *et al.*, 2007; CORTEZ *et al.*, 2019), deve ser considerado com o solo na capacidade de campo, o que não ocorreu nas avaliações deste estudo, não sendo encontrado limites críticos específicos para as condições de cvagua avaliadas (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

Para essas predições categóricas, utilizou-se o Random forest e o Random forest categórico, utilizando como métricas de validação, o coeficiente Kappa (KC) (equação (10)) e a acurácia global (OA) (equação (11)) em uma matriz de confusão (ANDRADE *et al.*, 2022), e as equações utilizadas foram:

$$OA = \frac{P_c}{N} \quad (10)$$

$$KC = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (11)$$

em que, P_c é a soma da diagonal principal da matriz de confusão, sendo a afirmativa correta se o solo está ou não compactado (SIM ou NÃO), N é o número total de amostras de validação, P_o é a concordância observada e P_e é a probabilidade de concordância aleatória. A acurácia

global assume valores de 0 a 1 e o Kappa de -1 a 1, quanto mais próximo de 1, maior a precisão e mais confiável é o modelo (LANDIS; KOCH, 1977; CONGALTON, 1991; ANDRADE *et al.*, 2022).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Calibração

A figura 15 mostra a relação entre os valores de resistividade elétrica obtidos nos ensaios em laboratório com os diferentes valores de umidade que foram obtidos à medida que as amostras foram secando em laboratório, considerando três graus de compactação (GC) que foram obtidos pela D_s em cada tratamento do experimento de campo e a D_s máxima obtida pelo ensaio de Proctor Normal (GC de 87, 90 e 92%). Foi ajustado o modelo linear, separado por GC, o qual resultou em coeficientes de determinação (R^2) maiores que 60%. Pode-se observar que existem dois padrões diferentes nesta relação, o que também foi observado por Melo *et al* (2021). O padrão A, é a condição de solo mais úmido, que parte das amostras saturadas até a umidade de cerca de 30%, já o padrão B é a condição de solo mais seco, com valores de umidade abaixo desse limite de 30%.

Pode-se observar, que no padrão A, considerando um mesmo valor de umidade, observa-se que o maior valor de GC (92%) apresenta maiores valores de resistividade quando comparado aos outros GC, indicando que nessa situação, solos mais compactados tendem a apresentar maiores valores de resistividade elétrica, diferente do que foi apresentado por autores como Samouelian *et al.* (2005), que mostraram que a resistividade elétrica tem relação negativa com a D_s , e positiva com a macroporosidade (ma), indicando assim, que solos compactados apresentem menores valores de resistividade, pois apresentam aumento na D_s e redução da ma , assim, essa relação entre compactação do solo e resistividade elétrica encontrada nesse padrão, pode ser devida à umidade mais elevada, que está sobressaindo sobre o efeito da estrutura do solo, e conseqüentemente sobre a compactação (MELO *et al*, 2021).

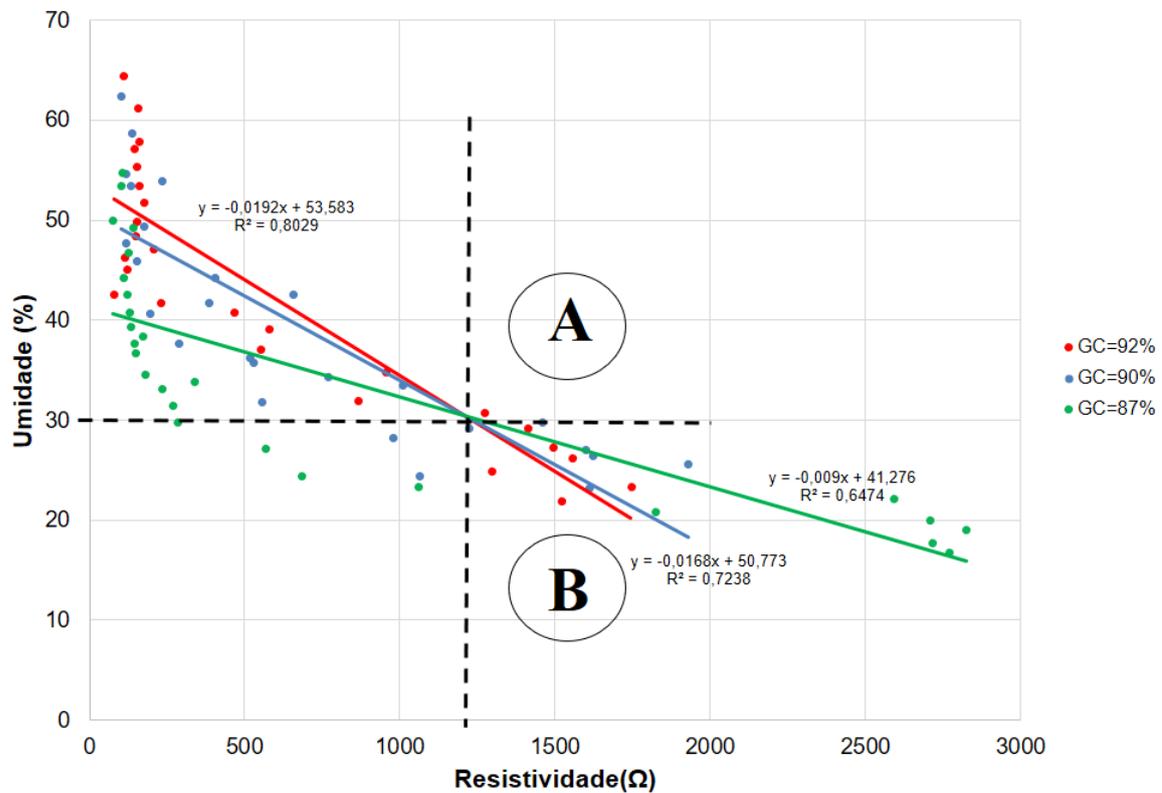
Já no padrão B, ocorre o contrário, para um mesmo valor de umidade, o maior GC apresentou os menores valores de resistividade elétrica, indicando assim, que solos mais compactados tendem a apresentar menores valores de resistividade elétrica, corroborando assim, com Roodposhti *et al.* (2019), que em condição de solos temperados, também observaram essa relação.

Isso indica, portanto, que para avaliar a compactação com base na resistividade, os ensaios devem ser realizados em condições de solo mais seco (umidade abaixo de 30%), pois o

efeito da umidade é menor, e nesse caso, variações de resistividade indicam de fato, o efeito da compactação do solo (MELO *et al.*, 2021).

No entanto, em condições de campo, o padrão A é mais provável de ocorrer (MELO *et al.*, 2021) uma vez que, solos tropicais, argilosos e muito intemperizados como o solo deste estudo, apresentam uma boa estruturação, que possibilitam um bom armazenamento de água, sendo difícil encontrar condições de umidade com valores muito abaixo de 30%. Serafim *et al.* (2013) monitorando a umidade em Latossolos argilosos do Cerrado, encontraram que no auge do período seco na região o menor valor encontrado foi de 23%.

Figura 15 – Relação entre resistividade elétrica do solo e umidade do solo em função do grau de compactação



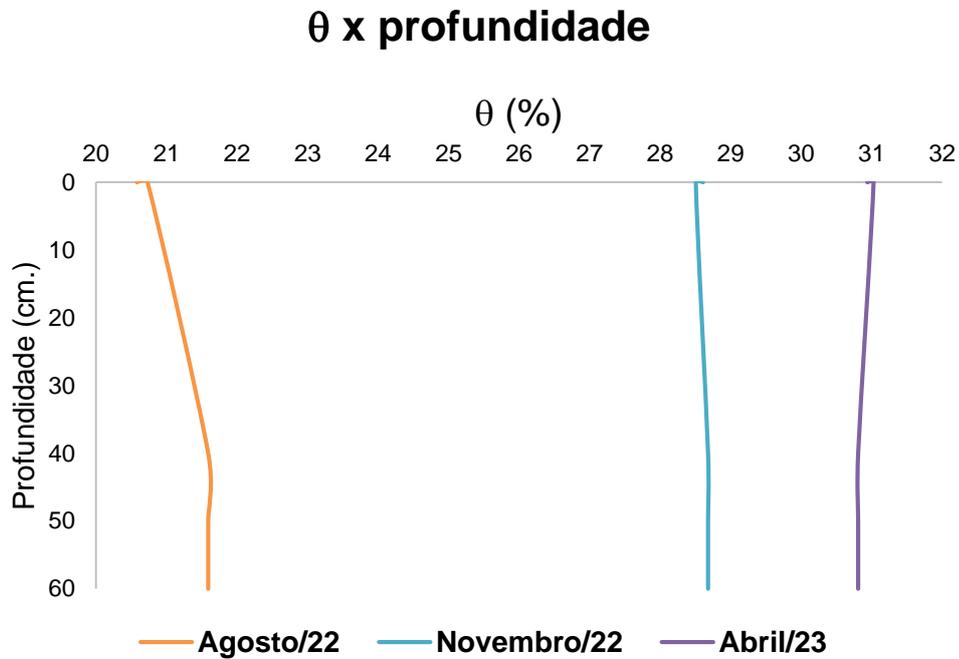
Fonte: Do autor (2023).

6.2. Correlações entre propriedades eletromagnéticas e propriedades físicas e químicas do solo

A figura 16 mostra a variação de umidade volumétrica (θ) em função da profundidade para as três épocas de avaliação (Agosto/22, Novembro/22 e Abril/23) pode-se observar que em ambas as épocas os valores foram abaixo dos 30%, cerca de 21% em Agosto e cerca de 28-29% em novembro, condição ideal, conforme figura 15, para evitar o efeito da umidade, exceto

para a época de abril, em que a umidade ficou um pouco acima desses 30%, entretanto, com valor bem próximo (31%).

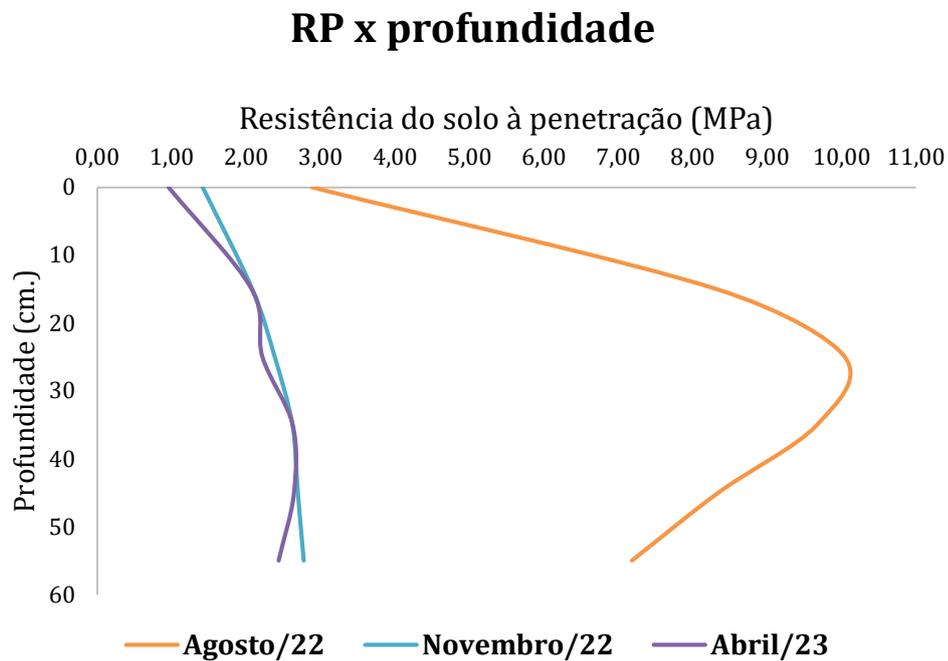
Figura 16 – Gráfico representando a variação de θ em função da profundidade para as três épocas de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

A figura 17 mostra a variação de RP em função da profundidade para as três épocas de avaliação, pode-se observar que em condição de solo mais seco, com menores valores de θ , que nesse caso, ocorreu em agosto/2022, conforme figura 1, têm-se os maiores valores de RP, atingindo valores superiores a 10MPa, em contrapartida, nas épocas de Novembro/22 e Abril/23, que apresentaram maiores valores de θ , têm-se valores de RP inferiores aos valores observados em Agosto/22, mostrando a relação inversa entre θ e RP (ARAUJO; TORMENA; SILVA, 2004).

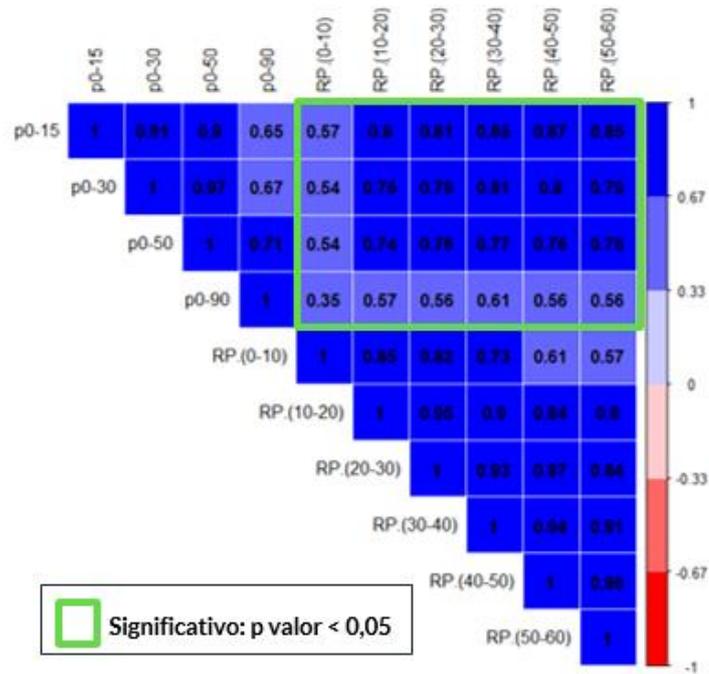
Figura 17 – Gráfico representando a variação de RP em função da profundidade para as três épocas de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

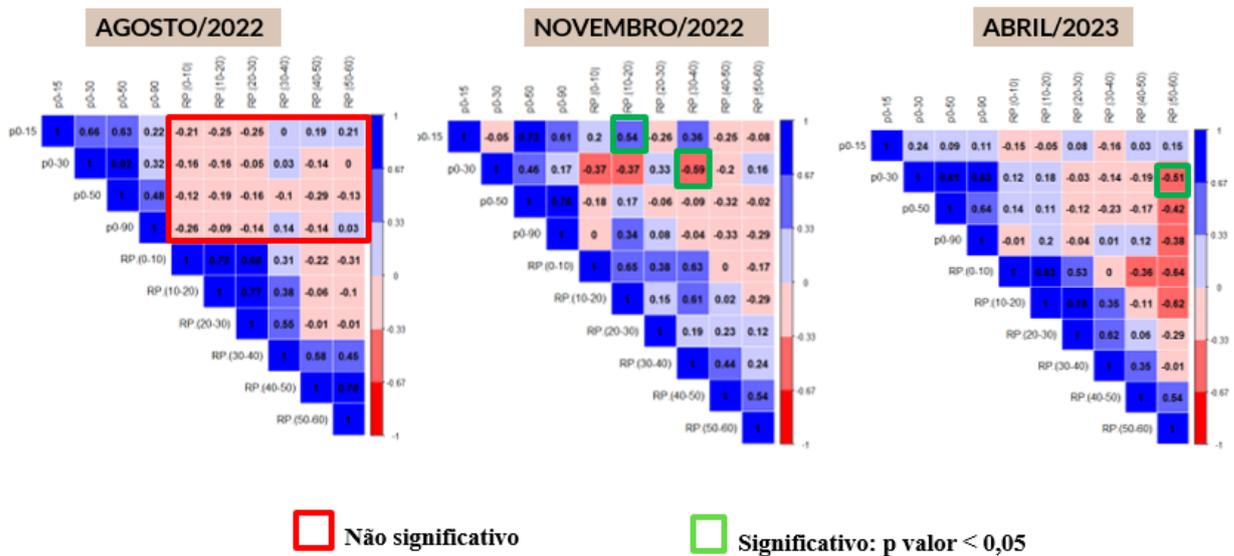
A figura 18 mostra a correlação entre a ρ e a RP em diferentes profundidades, desconsiderando o efeito da época de avaliação. Pode-se observar que foram observadas correlações positivas e significativas entre a ρ e a RP em todas as profundidades avaliadas, indicando que existe uma relação direta entre essas duas variáveis, em que os valores de uma variável aumentam a medida que se aumentam os valores da outra variável, diferente do que foi observado por autores como Naderi-Boldaji *et al.* (2014), entretanto, quando se analisa essa correlação considerando o efeito da época (figura 19) esse comportamento não é observado, para a época de agosto não foram observadas correlações significativas, em novembro foi observada uma correlação significativa e positiva entre a ρ_{0-15} e RP (10-20) e uma negativa entre a ρ_{0-30} e RP(30-40) e em abril foi observada uma correlação significativa e negativa entre a ρ_{0-30} e RP(50-60), no entanto, essas correlações foram pouco expressivas e não seguiram o mesmo padrão da figura 18.

Figura 18 – Correlação de Pearson (ρ x RP) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

Figura 19 – Correlação de Pearson (ρ x RP) considerando o efeito da época de avaliação

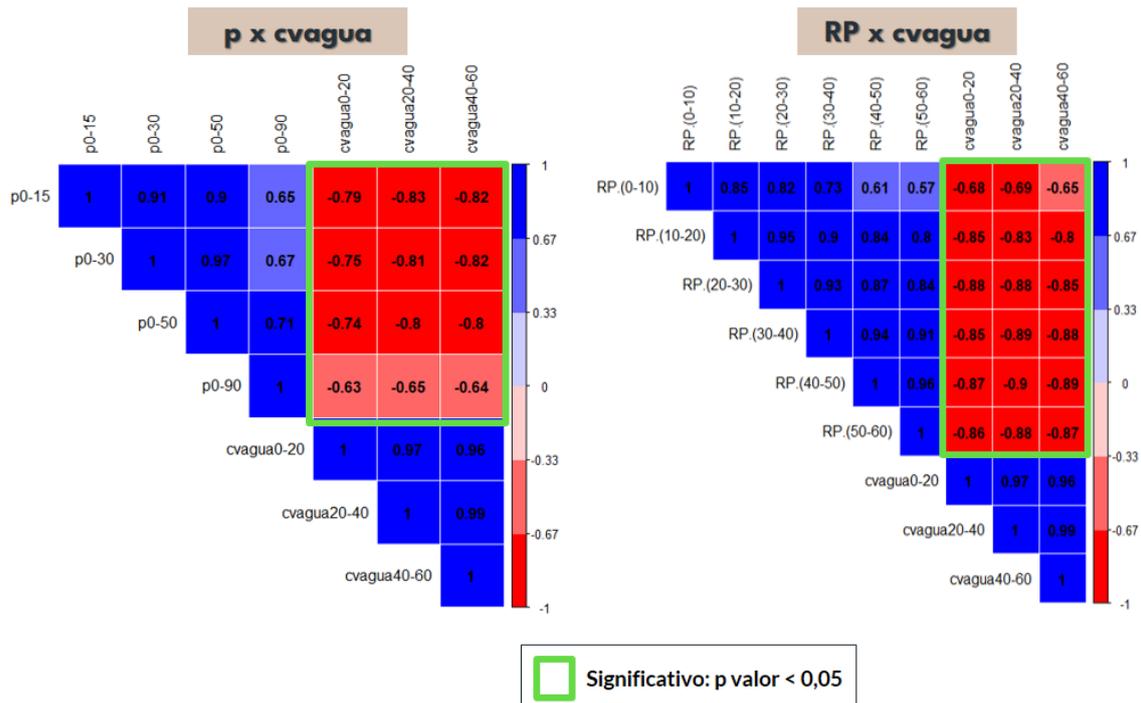


Fonte: Do autor (2023).

No entanto, pode-se observar que os valores de θ (cvágua) apresentam correlação significativa e de forma negativa tanto com a ρ , quanto com a RP (Figura 20), para ambas as profundidades avaliadas, ou seja, em condição de cvágua mais elevada, os valores de ρ e de RP

tendem a ser mais baixos, e mais altos em condição de solo mais seco (cvagua mais baixo), corroborando com autores como Melo *et al* (2021), que observou esse mesmo comportamento entre a θ e a ρ , e diversos autores como Naderi-Boldaji *et al.* (2014) também observaram essa relação negativa entre cvagua e RP.

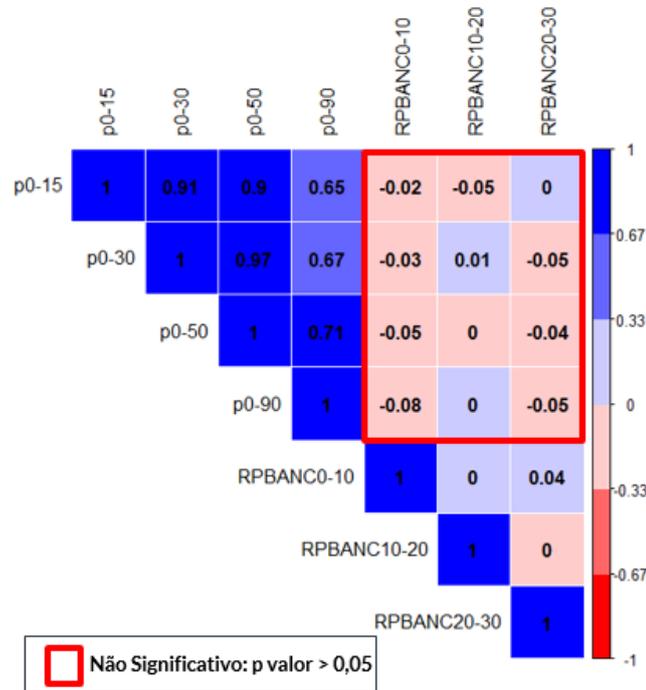
Figura 20 – Correlação de Pearson (ρ x cvagua e RP x cvagua) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

E para reforçar ainda mais esses resultados, a figura 21 mostra a correlação entre a ρ e a RP medida por um outro equipamento, o penetrômetro de bancada (RPBANC), em condições de laboratório, utilizando amostras de solo indeformadas, e não foi observada correlação significativa em nenhuma profundidade avaliada. Importante destacar que, neste caso, a umidade é controlada, trabalhando com a amostra submetida à tensão 100KPa, com cvagua em torno de 28,8% e desvio padrão (DP) de 3,62, não havendo variação de cvagua, diferente da figura 18.

Figura 21 – Correlação de Pearson (ρ x RPBANC) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

Além da RP, foram realizadas correlações entre a ρ e diversas outras propriedades físicas do solo, importante destacar que, embora, as análises de ρ tenham ocorrido até a profundidade de 0-90cm, os atributos físicos foram avaliados apenas até a profundidade de 30 cm, visto que, a leitura da ρ não é linear com a profundidade (SUDDUTH *et al.*, 2005), os eletrodos que captam a leitura de ρ de até 90 cm, apresentam 90% da sua resposta proveniente da camada de 0-0,30m. (WAGNER *et al.*, 2018).

A figura 22 mostra essa correlação desconsiderando o efeito das épocas de avaliação, e observa-se que não foram encontradas correlações significativas, não sendo possível observar um padrão de comportamento.

Já a figura 23 mostra essas correlações considerando o efeito das épocas de avaliação, pode-se observar que em Abril/23 não foram observadas correlações significativas, o que pode ser justificado por se tratar de uma época mais úmida (31%) (Figura 16), que de acordo com a figura 15 se encontra no ponto de cruzamento das retas, nesse ponto não temos um padrão de comportamento entre a p e a cv gua, o que pode justificar a ausência de um padrão na correlação para essa época de avaliação.

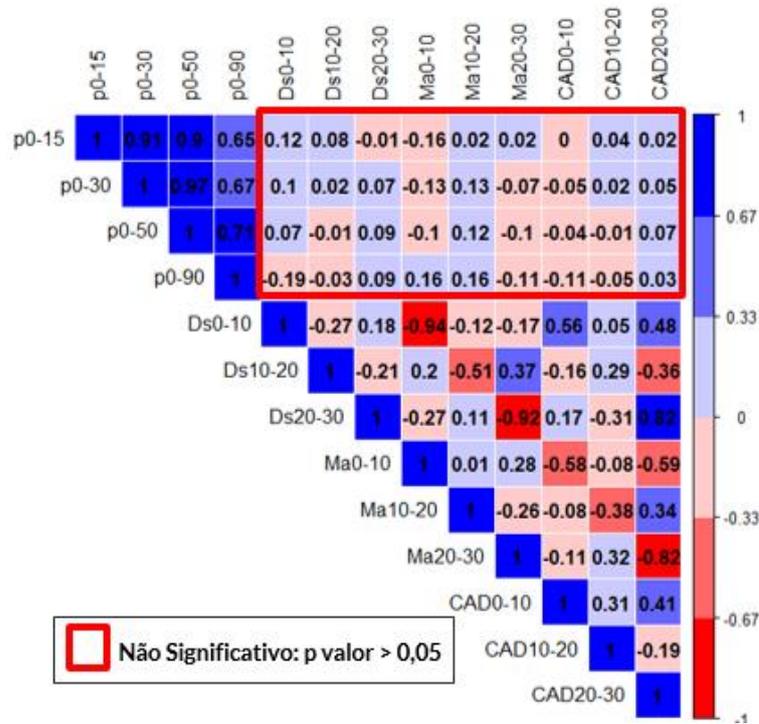
Já em condição de solo um pouco mais seco, cv gua de aproximadamente 28,5% encontrado na época de novembro (Figura 16), pôde-se observar um padrão de comportamento

entre a ρ e os atributos físicos do solo na camada de 0-10cm, relacionando-se de forma positiva com a m_a , e de forma negativa com a D_s e a CAD, para a m_a e a D_s , essa correlação foi significativa para a ρ nas profundidades de 0-15, 0-50 e 0-90, e para a CAD a significância ocorreu para a ρ 0-50 e 0-90, observa-se que, a ρ na camada de 0-30, utilizada pelos equipamentos *Veris 3100* da *Stara S/A Indústria de Implementos Agrícolas* (RABELLO *et al*, 2008), e o *Terram*, da *Falker Automação Agrícola LTDA* (BOTTEGA *et al*, 2022) não apresentou correlação significativa para essa condição, e as camadas de 0-15 e 0-50, que não são profundidades utilizadas por esses equipamentos, se mostraram promissoras, podendo assim, com base em mais estudos, servir de subsídio para os fabricantes desses equipamentos.

Para a época de agosto, época ainda mais seca, cvagua em torno de 21% (Figura 16), esperava-se as melhores correlações, visto que, de acordo com a figura 15, para a classe de solo estudada, isso ocorre para valores de cvagua abaixo de 30%. Entretanto, observa-se um certo padrão entre a ρ e a D_s na camada de 0-10, assim como observado na época de novembro, entretanto, não significativo. Observa-se também, um padrão ainda mais forte, entre a M_a 10-20 e a ρ nas profundidades de 0-30, 0-50 e 0-90, mas foi significativo apenas para a ρ 0-30.

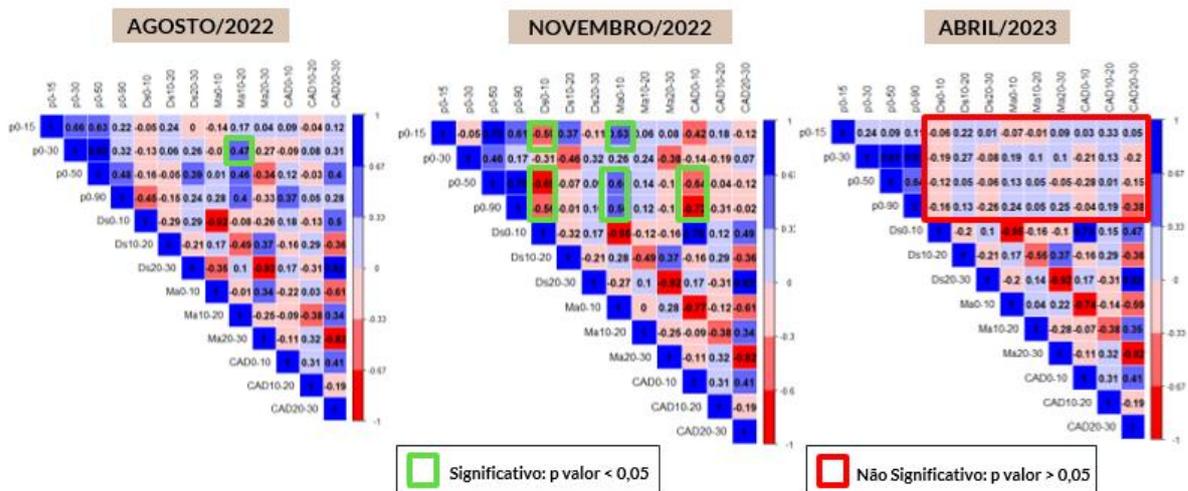
Essa menor correlação observada em condições mais úmidas (Abril), foi observada por diversos autores, como Samouelian *et al.* (2005), Naderi-Boldaji *et al* (2014) e Melo *et al.* (2021), que destacaram que a melhor correlação entre a ρ e os atributos físicos do solo observa-se em condições de solo mais seco, conforme observado em novembro, entretanto, essa premissa não foi satisfeita para a época de agosto, que apesar de apresentar a condição de menor cvagua em relação as três épocas de avaliação, não apresentou uma boa correlação, deste modo, pode-se inferir que possa existir uma faixa ideal de umidade em que essa correlação é mais expressiva para o solo estudado, sendo a faixa de cvagua inferior a 30% e superior a 21%, necessitando assim, de mais estudos nesta faixa de cvagua.

Figura 22 – Correlação de Pearson (ρ x propriedades físicas do solo) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

Figura 23 – Correlação de Pearson (ρ x propriedades físicas do solo) considerando o efeito da época de avaliação



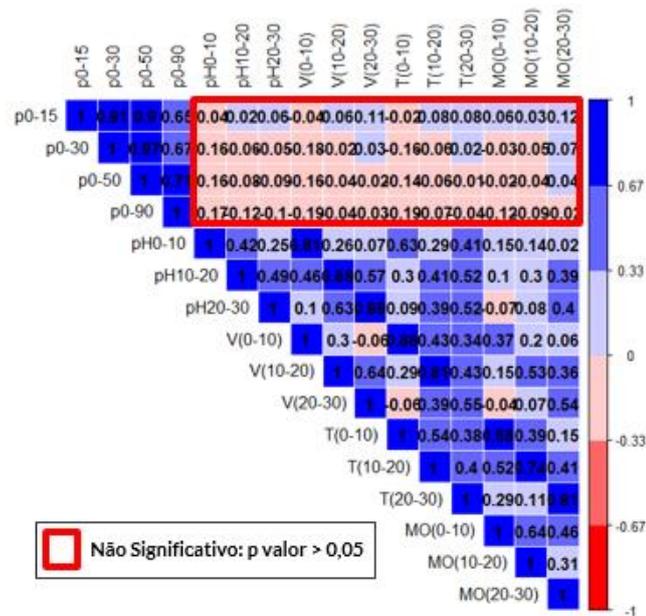
Fonte: Do autor (2023).

Em relação aos atributos químicos do solo, as figuras 24 e 25 mostram as correlações de ρ com esses atributos, desconsiderando o efeito da época de avaliação, e considerando esse

efeito. Pode-se observar que desconsiderando o efeito da época de avaliação, não foram encontradas correlações significativas (Figura 24). Considerando o efeito da época de avaliação (Figura 25) a saturação por bases na camada de 0-10 (V(0-10)) apresentou correlação significativa com a ρ em todas as épocas de avaliação, em Agosto/22, essa correlação foi observada nas profundidades de ρ 0-30, ρ 0-50 e ρ 0-90, também observou-se correlação significativa com o pH(0-10) para as mesmas profundidades de ρ . Já para a época de Novembro/22 a profundidade de ρ 0-90 se destacou, apresentando correlações significativas com o pH, V, T e MO nas camadas de 0-10, e com esses três últimos na camada de 10-20 também, enquanto na época de Abril/23, as correlações foram menos expressivas, apresentando como significativa apenas a correlação de V(0-10) com a ρ 0-30 e a ρ 0-90, o que pode ser justificado pela maior umidade.

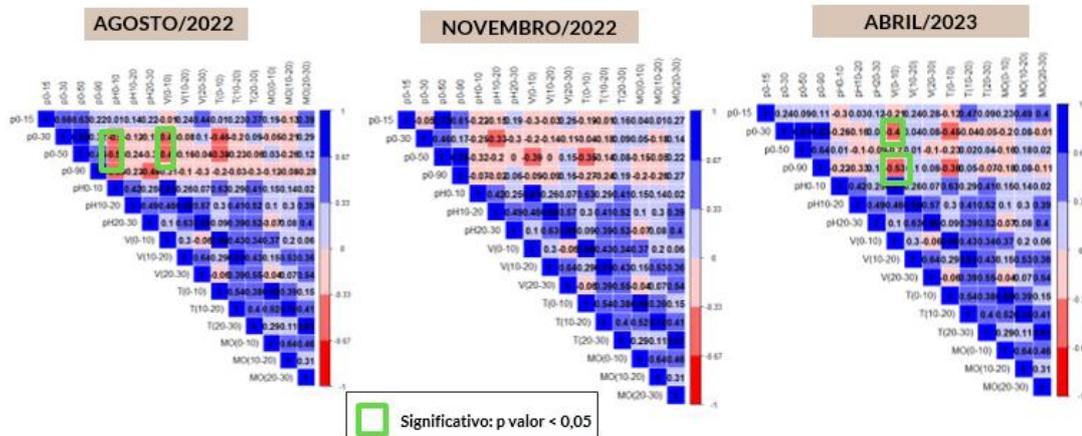
As melhores correlações, encontradas em agosto podem ser justificadas pela menor umidade ao longo do perfil, havendo assim, uma maior expressão da fase sólida do solo e uma correlação significativa com as diferentes profundidades de avaliação de ρ , corroborando com autores como McBride, Gordon e Shrive (1990), que também observam essa correlação da ρ com os teores de Cálcio, Magnésio e saturação de bases (V%) e ressaltaram que a relação com estes atributos físicos, varia em função do tipo de solo.

Figura 24 – Correlação de Pearson (ρ x atributos químicos do solo) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

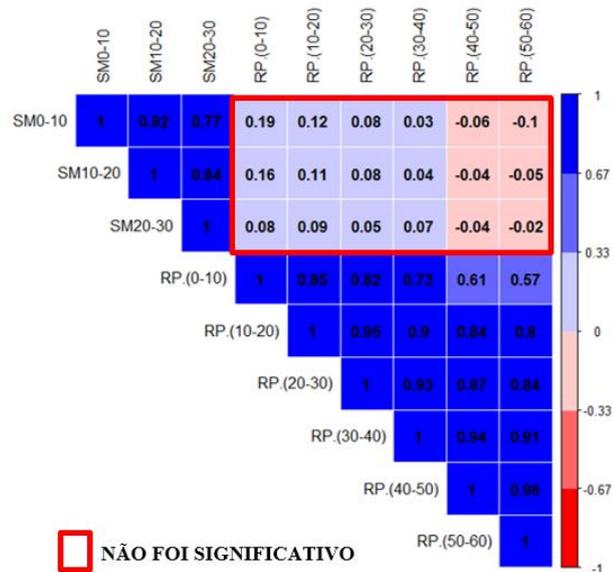
Figura 25 – Correlação de Pearson (ρ x atributos químicos do solo) considerando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

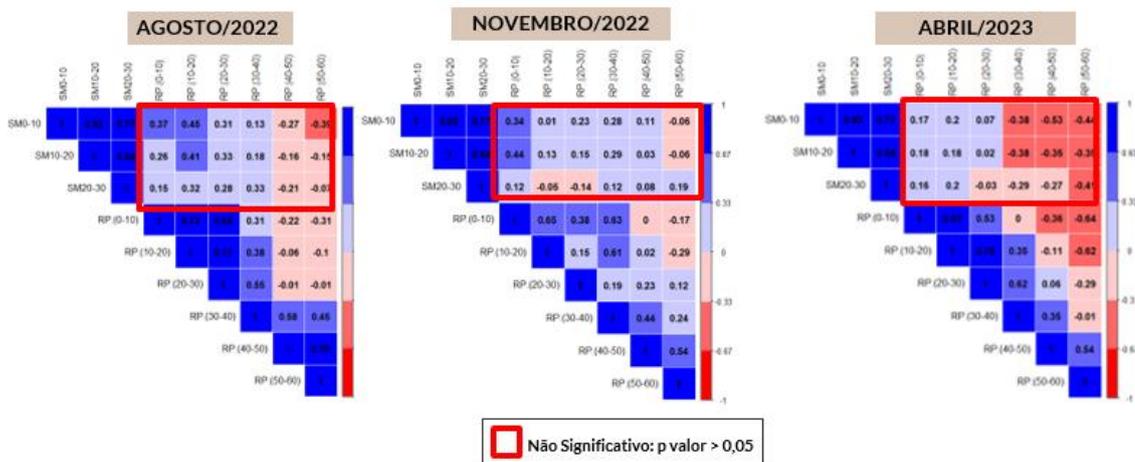
Em relação à Susceptibilidade Magnética (SM), as figuras 26 e 27 mostram a correlação entre essa propriedade eletromagnética e a RP. Pode-se observar que não houve correlação significativa para nenhuma profundidade avaliada nem desconsiderando o efeito da época (Figura 26) e nem considerando (Figura 27) diferente de Pentos, Pieczarka e Serwata, (2021) que em condição de solo de clima temperado, no continente europeu, encontraram uma boa correlação entre a SM e a RP, entretanto, os autores não justificaram o motivo disto ter ocorrido. Não existem outros estudos no Brasil e pouquíssimos no mundo que avaliaram essa correlação, carecendo assim, de mais estudos sobre esse tema.

Figura 26 – Correlação de Pearson (SM x RP) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

Figura 27 – Correlação de Pearson (SM x RP) considerando o efeito da época de avaliação

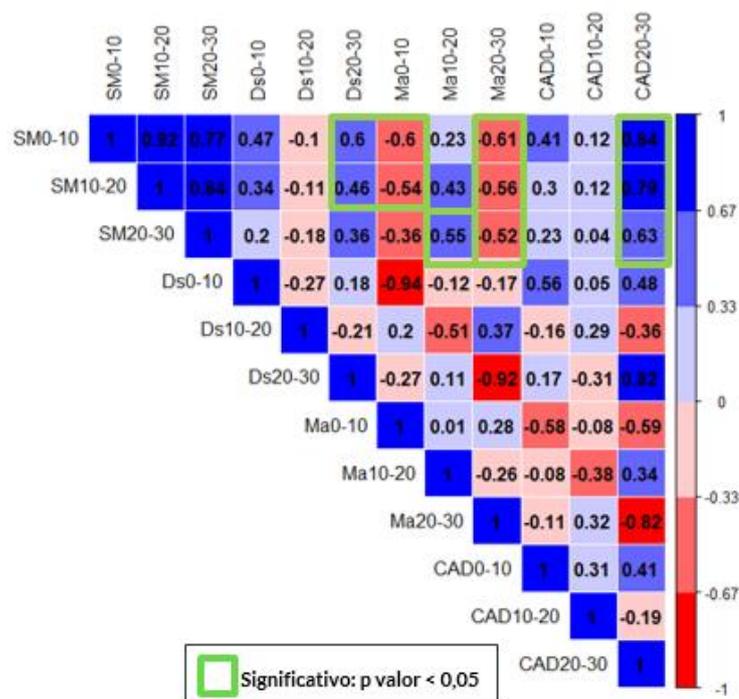


Fonte: Do autor (2023).

A figura 28 mostra a correlação entre a SM e as propriedades físicas do solo. Pode-se observar, que houve correlação significativa com todas as propriedades avaliadas, sobretudo, nas camadas de 0-10 e 20-30. Entretanto, não existem estudos que mostram essa correlação, mas existem estudos que mostram uma boa correlação entre SM e o teor de argila (PENTOS; PIECZARKA; SERWATA, 2021), sobretudo, em condições de solos intemperizados de clima tropical, ricos em óxidos de ferro (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989), culminando em uma relação ainda melhor da argila com a SM.

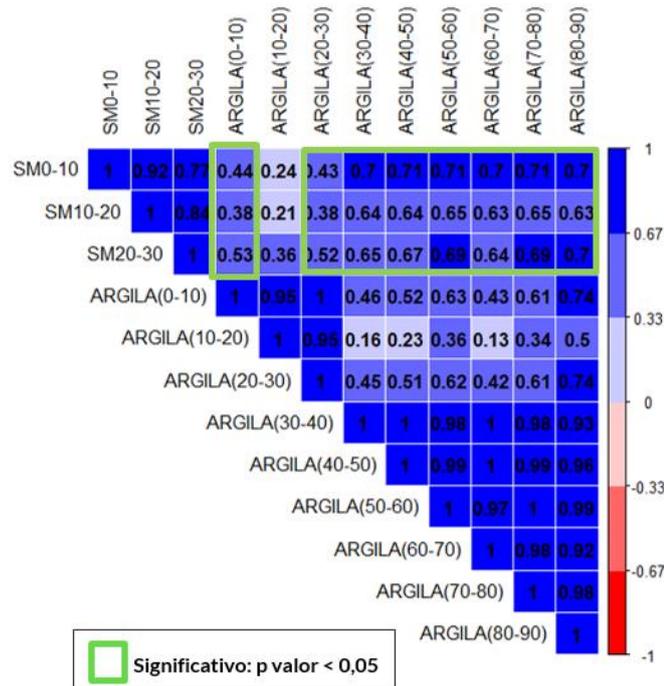
A figura 29 mostra essa correlação entre a SM e o teor de argila, e pode-se observar que as correlações foram significativas e positivas em quase todas as profundidades de argila, exceto para a profundidade de 10-20, o que também se observa na figura 30, que mostra a correlação entre o teor de argila e as propriedades físicas do solo. Na figura 30, observa-se que as correlações foram significativas para os atributos Ds, Ma e CAD na camada 20-30, de forma positiva com a Ds e a CAD e de forma negativa com a Ma, assim como ocorreu nas correlações entre a SM e essas propriedades, indicando que essas correlações significativas que existiram entre esses atributos e a SM, podem ter ocorrido de forma indireta, se justificando pelo teor de argila e não pelas propriedades físicas de fato, visto que a argila se relaciona com a estrutura do solo.

Figura 28 – Correlação de Pearson (SM x propriedades físicas do solo) desconsiderando o efeito da época de avaliação



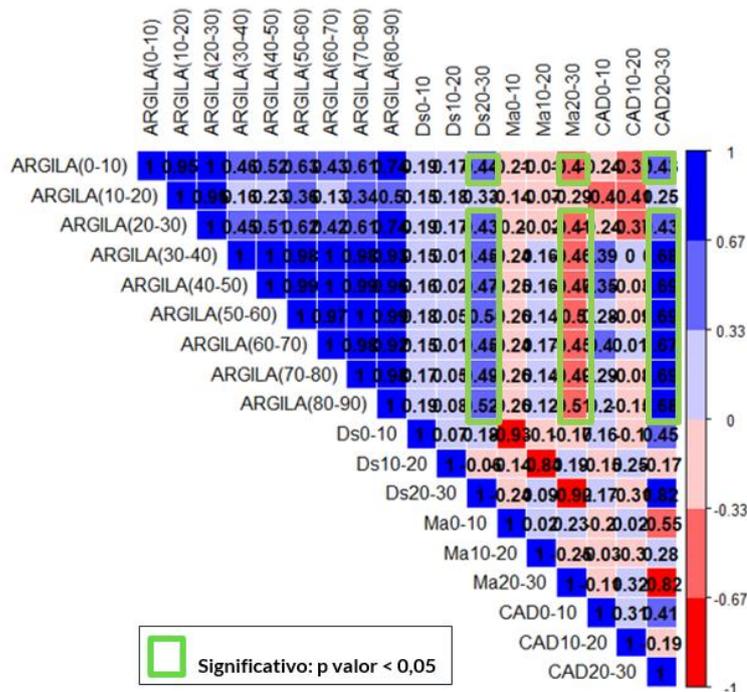
Fonte: Do autor (2023).

Figura 29 – Correlação de Pearson (SM x Argila) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

Figura 30 – Correlação de Pearson (Argila x propriedades físicas do solo) desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

6.3. Predições de propriedades físicas indicadoras da compactação

As tabelas de 1 a 4 mostram o desempenho dos 4 modelos, linear (L), linear generalizado (LG), Random forest (RF) e Random forest categórico (RFc), para predição dos atributos físicos (Ds, Ma, CAD e GC) para as profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e o acumulado dessas 3 camadas 0-30, considerando os resultados das três camadas citadas anteriormente. A tabela 1 apresenta esses resultados desconsiderando o efeito da época de avaliação, já as tabelas 2, 3 e 4 apresentam os resultados considerando as épocas de Abril/2023, novembro/2022 e agosto/2022, respectivamente.

Os melhores modelos são os que apresentam maior Coeficiente de determinação (R^2), e menores raiz do erro quadrático médio (RMSE) e erro médio absoluto (MAE), (ANDRADE *et al*, 2022). Pode-se observar o destaque da camada de 20-30, sobretudo para os modelos do machine learning (RF e RFc), tanto para os dados sem considerar o efeito da época de avaliação (Tabela 1), quanto considerando as épocas separadamente (tabelas de 2 a 4), indicando que a combinação entre as propriedades eletromagnéticas e a utilização dos dados de entrada auxiliares (resultados da análise química do solo), melhoraram essa predição quando comparada com os resultados do modelo L, em que não considera a combinação dessas propriedades e também não considera os resultados da análise química do solo, e que o uso do machine learning se mostrou eficiente, diminuindo o RMSE e o MAE e aumentando o valor do R^2 .

Na época de Novembro (tabela 4), pode-se observar que a profundidade de 0-10 também se destacou, juntamente com a camada de 20-30, e nos modelos L e LG, foi a profundidade que apresentou os melhores resultados em comparação com as outras profundidades, o que pode se justificar pelo destaque dessa época de avaliação, nas correlações entre ρ e os atributos físicos do solo de acordo com a correlação de Pearson (Figura 25), que ocorreu justamente com os atributos físicos nessa profundidade de 0-10.

Tabela 1 - Performance de modelos de predição de propriedades físicas do solo a partir de propriedades eletromagnéticas do solo e auxiliares (químicas) para todo o conjunto de dados, desconsiderando a época de avaliação

Prof.	0-10			10-20			20-30			0-30			
Modelo	P.F	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE
L	RP	0,94	0,32	0,73	1,99	0,63	1,41	2,32	0,66	1,62	2,53	0,42	1,75
	Ds	0,08	0,22	0,07	0,07	0,01	0,06	0,08	0,13	0,07	0,08	0,06	0,07
	Ma	1,18	0,37	1,18	1,24	0,18	1,24	1,22	0,27	1,22	1,22	0,06	1,21
	CAD	0,03	0,17	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,40	0,01	0,02	0,16	0,02
	GC	5,74	0,13	5,01	5,10	0,01	4,43	5,00	0,13	4,34	5,63	0,04	4,59
LG	RP	0,89	0,40	0,66	1,73	0,72	1,22	1,94	0,76	1,45	2,17	0,58	1,58
	Ds	0,09	0,28	0,07	0,05	0,53	0,03	0,03	0,90	0,02	0,08	0,11	0,06
	Ma	0,02	0,39	0,02	0,02	0,73	0,01	0,01	0,96	0,01	0,03	0,13	0,03
	CAD	0,03	0,36	0,02	0,01	0,50	0,01	0,02	0,49	0,01	0,02	0,29	0,02
	GC	3,21	0,73	2,35	3,00	0,67	2,38	1,67	0,90	1,16	5,45	0,13	4,44
RF	RP	0,92	0,37	0,68	1,42	0,81	0,95	2,03	0,74	1,31	1,80	0,71	1,06
	Ds	0,06	0,61	0,04	0,02	0,98	0,01	0,01	0,99	0,01	0,03	0,85	0,02
	Ma	0,02	0,63	0,01	0,01	0,96	0,01	0,00	0,99	0,00	0,01	0,91	0,01
	CAD	0,01	0,99	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,99	0,00
	GC	1,23	0,99	1,06	1,05	0,97	0,76	0,64	0,99	0,50	0,95	0,99	0,75
RFc	RP	0,78	0,54	0,57	1,36	0,83	0,83	1,83	0,79	1,10	1,78	0,71	1,05
	Ds	0,06	0,62	0,04	0,02	0,98	0,01	0,01	0,99	0,01	0,04	0,84	0,02
	Ma	0,02	0,66	0,01	0,01	0,95	0,01	0,00	0,99	0,00	0,01	0,91	0,01
	CAD	0,01	0,99	0,00	0,00	0,98	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,98	0,00
	GC	1,16	0,99	0,94	1,05	0,97	0,72	0,65	0,99	0,52	0,94	0,99	0,74

P.F – Propriedade física; RMSE - Raiz do erro quadrático médio; R²- Coeficiente de determinação; MAE – Erro médio absoluto; RP – Resistência à penetração; Ds – Densidade do solo; Ma – Macroporosidade; CAD – Capacidade de água disponível; GC – Grau de compactação; L – Linear; LG – Linear generalizado; RF – Random Forest; RFc – Random Forest categórico.

Tabela 2 - Performance de modelos de predição de propriedades físicas do solo a partir de propriedades eletromagnéticas do solo e auxiliares (químicas), considerando a época de abril/23

Prof.		0-10			10-20			20-30			0-30		
Modelo	P.F	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE
L	RP	0,24	0,02	0,18	0,45	0,00	0,38	0,40	0,01	0,34	0,68	0,00	0,57
	Ds	0,83	0,28	0,07	0,07	0,01	0,06	0,08	0,13	0,07	0,08	0,07	0,07
	Ma	1,16	0,44	1,16	1,24	0,02	1,24	1,22	0,27	1,22	1,21	0,07	1,20
	CAD	0,03	0,17	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,40	0,01	0,02	0,16	0,02
	GC	7,54	0,13	5,01	5,10	0,01	4,43	5,00	0,13	4,34	5,63	0,04	4,60
LG	RP	1,48	0,01	1,11	16,56	0,07	10,81	33,36	0,01	17,02	0,77	0,03	0,62
	Ds	1,22	0,00	0,91	0,09	0,01	0,57	4,70	0,06	2,40	0,10	0,02	0,08
	Ma	0,36	0,01	0,27	0,38	0,12	0,25	0,58	0,05	0,30	0,04	0,01	0,03
	CAD	0,01	0,96	0,01	0,32	0,27	0,02	1,28	0,04	0,65	0,03	0,07	0,02
	GC	22,88	0,26	17,11	53,73	0,02	35,09	313,66	0,06	160,04	6,90	0,00	5,67
RF	RP	0,26	0,00	0,19	0,52	0,04	0,43	0,47	0,33	0,40	0,62	0,17	0,49
	Ds	0,11	0,05	0,10	0,08	0,03	0,07	0,06	0,44	0,05	0,09	0,01	0,08
	Ma	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,62	0,02	0,04	0,01	0,03
	CAD	0,04	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,51	0,01	0,03	0,08	0,02
	GC	7,32	0,19	6,40	4,52	0,22	3,70	3,99	0,45	3,35	6,01	0,00	5,04
RFc	RP	0,22	0,00	0,19	0,45	0,06	0,36	0,45	0,03	0,36	0,59	0,24	0,44
	Ds	0,11	0,09	0,09	0,07	0,01	0,07	0,06	0,45	0,05	0,09	0,01	0,08
	Ma	0,03	0,06	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,60	0,02	0,04	0,01	0,03
	CAD	0,04	0,00	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,48	0,01	0,03	0,07	0,02
	GC	6,97	0,10	5,88	4,61	0,23	3,86	4,05	0,44	3,47	5,99	0,00	4,98

P.F – Propriedade física; RMSE - Raiz do erro quadrático médio; R²- Coeficiente de determinação; MAE – Erro médio absoluto; RP – Resistência à penetração; Ds – Densidade do solo; Ma – Macroporosidade; CAD – Capacidade de água disponível; GC – Grau de compactação; L – Linear; LG – Linear generalizado; RF – Random Forest; RFc – Random Forest categórico.

Tabela 3 - Performance de modelos de predição de propriedades físicas do solo a partir de propriedades eletromagnéticas do solo e auxiliares (químicas), considerando a época de novembro/22

Prof.		0-10			10-20			20-30			0-30		
Modelo	P.F	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE
L	RP	0,39	0,03	0,32	0,37	0,30	0,28	0,60	0,11	0,47	0,64	0,01	0,49
	Ds	0,07	0,48	0,06	0,07	0,01	0,06	0,08	0,13	0,07	0,08	0,07	0,07
	Ma	1,17	0,43	1,17	1,25	0,19	1,24	1,22	0,27	1,22	1,21	0,07	1,21
	CAD	0,02	0,52	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,40	0,01	0,02	0,16	0,02
	GC	5,60	0,18	4,44	5,10	0,01	4,43	5,00	0,13	4,34	5,63	0,04	4,60
LG	RP	8,64	0,01	6,01	1,84	0,06	1,44	52,49	0,05	25,86	0,91	0,02	0,68
	Ds	0,06	0,61	0,05	0,49	0,00	0,34	1,89	0,26	0,93	0,10	0,00	0,08
	Ma	0,02	0,64	0,02	0,12	0,01	0,10	0,17	0,02	0,09	0,04	0,01	0,03
	CAD	0,03	0,43	0,02	0,11	0,04	0,09	0,80	0,05	0,40	0,03	0,06	0,02
	GC	442,25	0,01	166,00	34,43	0,08	24,03	126,26	0,26	62,19	6,68	0,02	5,23
RF	RP	0,45	0,05	0,35	0,50	0,07	0,39	0,65	0,01	0,54	0,61	0,11	0,51
	Ds	0,07	0,47	0,06	0,08	0,10	0,07	0,06	0,41	0,05	0,09	0,00	0,07
	Ma	0,02	0,60	0,02	0,03	0,00	0,02	0,03	0,62	0,02	0,04	0,00	0,03
	CAD	0,02	0,51	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,45	0,01	0,02	0,13	0,02
	GC	6,86	0,07	5,84	4,89	0,10	4,07	4,18	0,40	3,50	5,50	0,11	4,23
RFc	RP	0,43	0,01	0,33	0,46	0,00	0,37	0,66	0,00	0,54	0,61	0,12	0,50
	Ds	0,08	0,49	0,07	0,08	0,09	0,07	0,06	0,43	0,05	0,09	0,01	0,08
	Ma	0,02	0,61	0,02	0,03	0,00	0,02	0,03	0,62	0,02	0,04	0,00	0,03
	CAD	0,03	0,48	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,44	0,01	0,02	0,12	0,02
	GC	6,44	0,00	5,41	4,87	0,11	4,18	4,16	0,40	3,54	5,54	0,10	4,28

P.F – Propriedade física; RMSE - Raiz do erro quadrático médio; R²- Coeficiente de determinação; MAE – Erro médio absoluto; RP – Resistência à penetração; Ds – Densidade do solo; Ma – Macroporosidade; CAD – Capacidade de água disponível; GC – Grau de compactação; L – Linear; LG – Linear generalizado; RF – Random Forest; RFc – Random Forest categórico.

Tabela 4 - Performance de modelos de predição de propriedades físicas do solo a partir de propriedades eletromagnéticas do solo e auxiliares (químicas), considerando a época de agosto/22

Prof.		0-10			10-20			20-30			0-30		
Modelo	P.F	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE
L	RP	1,63	0,04	1,10	2,34	0,06	1,89	2,54	0,02	1,98	3,71	0,02	3,20
	Ds	0,08	0,14	0,07	0,07	0,01	0,06	0,08	0,13	0,07	0,08	0,05	0,06
	Ma	1,21	0,03	1,21	1,25	0,19	1,24	1,22	0,27	1,22	1,23	0,05	1,22
	CAD	0,03	0,17	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,40	0,01	0,02	0,16	0,02
	GC	5,74	0,13	5,01	5,10	0,01	4,43	5,00	0,13	4,34	5,63	0,04	4,60
LG	RP	4,51	0,02	3,63	21,04	0,10	14,29	22,74	0,00	12,16	3,28	0,32	2,52
	Ds	0,24	0,04	0,19	0,49	0,00	0,34	0,49	0,00	0,26	0,10	0,00	0,08
	Ma	0,06	0,07	0,05	0,28	0,02	0,19	0,10	0,11	0,05	0,04	0,00	0,03
	CAD	0,15	0,00	0,16	0,18	0,02	0,12	0,64	0,01	0,34	0,03	0,06	0,02
	GC	8,93	0,29	6,81	5,46	0,36	3,71	32,58	0,00	17,42	7,42	0,01	5,54
RF	RP	1,43	0,18	1,30	2,59	0,04	2,13	2,71	0,00	2,22	3,02	0,35	2,35
	Ds	0,09	0,00	0,08	0,08	0,09	0,07	0,06	0,44	0,05	0,08	0,00	0,07
	Ma	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,62	0,02	0,04	0,00	0,03
	CAD	0,04	0,11	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,45	0,01	0,03	0,12	0,02
	GC	6,81	0,04	5,82	4,80	0,13	4,10	4,03	0,44	3,43	5,72	0,04	4,55
RFc	RP	1,35	0,02	1,22	2,54	0,06	2,04	2,68	0,00	2,21	2,95	0,38	2,33
	Ds	0,09	0,02	0,07	0,08	0,11	0,07	0,06	0,46	0,05	0,08	0,01	0,07
	Ma	0,03	0,00	0,02	0,03	0,00	0,03	0,03	0,64	0,02	0,04	0,00	0,03
	CAD	0,04	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,46	0,01	0,03	0,10	0,02

P.F – Propriedade física; RMSE - Raiz do erro quadrático médio; R²- Coeficiente de determinação; MAE – Erro médio absoluto; RP – Resistência à penetração; Ds – Densidade do solo; Ma – Macroporosidade; CAD – Capacidade de água disponível; GC – Grau de compactação; L – Linear; LG – Linear generalizado; RF – Random Forest; RFc – Random Forest categórico.

Além da predição dos atributos físicos de forma numérica, também foi realizada a predição categórica com base nos modelos do machine learnig (RF e RFc) (Tabela 5), para predizer se o solo está ou não está compactado com base nos atributos físicos, considerando as três épocas de avaliação separadamente, e desconsiderando o efeito das épocas de avaliação (geral), para as profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 e 0-30cm., quanto maior o coeficiente Kappa (KC) e a acurácia global (OA) melhor o modelo.

Novamente, pode-se perceber o destaque para a profundidade de 20-30cm., apresentando os maiores valores de KC e OA, para todas as épocas e para os dois modelos analisados, e desconsiderando o efeito da época (geral), apresentou KC e OA igual a 1, para os dois modelos, indicando que os modelos foram capazes de acertar em 100% essa predição categórica, diagnosticando como compactado onde realmente estava compactado (SIM – S), e como não compactado, onde realmente não estava compactado (NÃO – N) (Figura 31). E em relação as épocas, pode-se observar que a época de novembro se destacou em comparação com as outras duas épocas de avaliação.

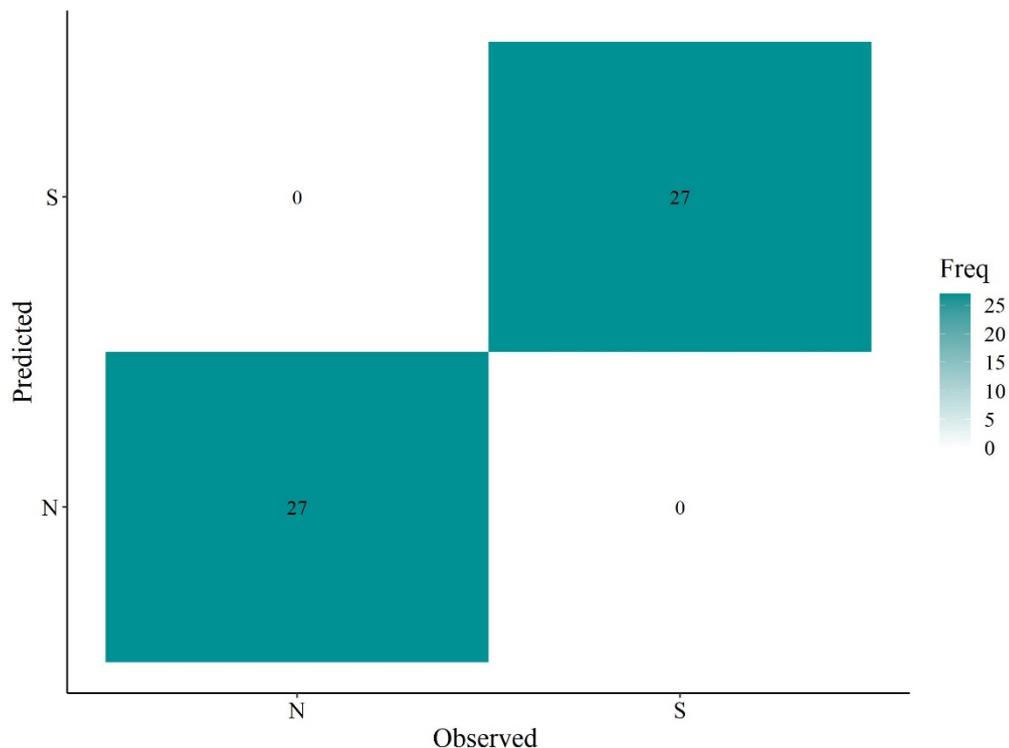
Os resultados obtidos com base nesses modelos, tanto para predição numérica, quanto categórica, corroboram com Pentos; Pieczark e Serwata (2021), que também mostraram que, em condição de solo temperado, os modelos de predição baseados no machine learning são boas ferramentas para predição da compactação do solo.

Tabela 5 - Performance de modelos para predição da compactação do solo de forma categórica, indicando se o solo está ou não compactado, considerando as diferentes épocas de avaliação

Prof.		0-10		10-20		20-30		0-30	
Modelo	Época	OA	KC	OA	KC	OA	KC	OA	KC
RF	Ago./22	0,61	0,00	0,78	0,00	0,89	0,78	0,63	0,00
	Nov./22	0,33	0,00	0,89	0,45	0,94	0,89	0,63	0,13
	Abr./23	0,17	0,00	0,78	0,00	0,94	0,89	0,61	0,15
	Geral	0,91	0,81	0,98	0,94	1,00	1,00	0,94	0,88
RFc	Ago./22	0,61	0,00	0,83	0,00	0,89	0,78	0,63	0,00
	Nov./22	0,39	0,00	0,83	0,00	0,94	0,89	0,61	0,08
	Abr./23	0,22	0,00	0,78	0,00	0,94	0,89	0,56	0,04
	Geral	0,89	0,77	0,94	0,82	1,00	1,00	0,94	0,88

RF – Random Forest; RFc – Random Forest categórico; OA – Acurácia global; KC – Coeficiente Kappa

Figura 31 – Matriz de confusão para a profundidade de 20-30cm., desconsiderando o efeito da época de avaliação



Fonte: Do autor (2023).

7. CONCLUSÕES

As propriedades eletromagnéticas (ρ e SM) e os modelos de predição baseados no *Machine learning* se mostraram uma importante ferramenta para predição da compactação do solo.

A época de avaliação em campo e a profundidade de avaliação das propriedades físicas influenciaram nas correlações entre essas propriedades e as propriedades eletromagnéticas.

Estudos futuros devem ser realizados avaliando essas relações na faixa de umidade de 21 a 30%.

REFERÊNCIAS

AGROADS. Veris Ce – Stara, 2023. Disponível em: < https://www.agroads.com.br/veris-ce-stara_79760.html>. Acesso em: 28 dez. 2023.

ALLRED, B. J.; DANIELS, J. J.; EHSANI, M. R. Handbook of agricultural geophysics. **CRC Press**, 2008.

ALPHAGEOFISICA. Instrumentação de Suscetibilidade Magnética, 2017. Disponível em: < <https://alphageofisica.com.br/bartington/2012/susceptibilmetro.htm>>. Acesso em: 28 dez. 2023.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.20, p.319-326, 1996.

ALVARES, C.A., STAPE, J.L., SENTELHAS, P.C., GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMARANTE, E. M. S. Interpretação de seções de resistividade e cargabilidade aparente. **Trabalho de graduação, Instituto de Geociências, UFBA, Salvador, Brasil**, 2014.

ANDRADE, R. et al. Proximal sensor data fusion and auxiliary information for tropical soil property prediction: Soil texture. **Geoderma**, v. 422, p. 115936, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115936>.

ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:337-345, 2004.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W. & JONES, A. J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, **Soil Science Society of America**. 1996. p. 123-141 (SSSA Special publication 49).

ASPINALL, A.; GAFFNEY, C. F. The Schlumberger array—potential and pitfalls in archaeological prospection. **Archaeological Prospection**, v. 8, n. 3, p. 199–209, 2001.

AYOUBI, S.; ADMAN, V. Iron mineralogy and magnetic susceptibility of soils developed on various rocks in western Iran. **Clays and Clay Minerals**, v. 67, n. 3, p. 217-227, 2019.

BAVER, L. D. Practical values from physical analyses of soils. **Soil Sci.**, 68:1-13, 1949.

- BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.*, 41:341- 358, 1990.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:787-794, 2006.
- BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop responses to wheel traffic soil compaction. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 34:909-913, 1991.
- BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.237-264.
- BORGES, WR. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicação no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado pelo IAG / USP**. 2007. 260 p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BORJA, M. S. **Modelagem e inversão de eletrorresistividade 1d usando Fortran moderno: arranjos Wenner e Schlumberger**. 2018. 55p. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2018.
- BOTTEGA, E. L. et al. Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo por diferentes equipamentos. *Revista Cultura Agrônômica*, v. 31, n. 1, p. 12-27, 2022.
- BRAIDA, J.A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 106p. (Tese de Doutorado)
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- CAMBI, M., HOSHIKA, Y., MARIOTTI, B., PAOLETTI, E., PICCHIO, R., VENANZI, R., MARCHI, E. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management*, 384, 406-414. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.045>, 2017.
- CANARACHE, A. PENETR - A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil Till. Res.*, 16:51-70, 1990.
- CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.7, p.323-327, 1983.
- CLAESSEN, M. E. C. Manual de métodos de análise de solo. **Embrapa Solos-Docmentos (INFOTECA-E)**, 1997.
- CONGALTON, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37, 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B).
- CORREA, J.; POSTMA, J. A.; WATT, M.; WOJCIECHOWSKI, T. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems. *Journal of Experimental Botany*, 70 (21), 6019–6034, 2019. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erz383>

- CORSINI, P. C.; FERRAUDO, A. S. Effects of tillage systems on bulk density, aeration porosity and root development of corn in a typic Haplorthox soil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 289-298, 1999.
- CORTEZ, J. W.; MORENO, C. T. M.; FARINHA, L. S.; ARCOVERDE, S. N. S.; VALENTE, I. Q. M. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um sistema de semeadura direta. **Científica**, Jaboticabal, v. 47, n. 2, p. 175-182, 2019.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1- 3, p. 11–43, 2005.
- COSTA, M. M. et al. Moisture content effect in the relationship between apparent electrical conductivity and soil attributes. *Acta Scientiarum*. **Agronomy**, v. 36, n. 4, p. 395, 2014.
- CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C.; FONTES, L.E.F. Vocabulário de ciência do solo. Campinas: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1993. 90p.
- DAVIS, R. S. Using small, rareearth magnets to study the susceptibility of feebly magnetic metals. **American Journal Physics**, New York, v. 60, n. 4, p. 365- 370, 1992.
- DE SOUZA BAHIA, A.S.R.; MARQUES, J.; LA SCALA, N.; CERRI, C.E.P.; CAMARGO, L.A. Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 2017, 81, 1450–1462.
- DEARING, J. A. change from magnetic proxies in lake sediments. **Quaternary climates, environments and magnetism**, p. 231, 1999.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e a sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.175-182, 1996.
- FALKER. Terram: Medidor de Condutividade elétrica do Solo, 2023. Disponível em: <https://www.falker.com.br/br/terram?gad_source=1&gclid=Cj0KCQIA1rSsBhDHARIsANB4EJZQJSe2v2_W1J_8zYjkP1PsuDOD6_Rr9OWPbi5QdrVvEGSIw8P4ljQaAms_EALw_wcB>. Acesso em: 28 dez 2023.
- FENTANES, J. P., GOULD, I., DUCKETT, T., PEARSON, S., & CIELNIAK, G. (2018). 3-D Soil Compaction Mapping Through Kriging-Based Exploration With a Mobile Robot. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 3(4), 3066–3072. doi:10.1109/ra.2018.2849567
- FERNANDES, M. M. H.; COELHO, A. P.; SILVA, M. F.; BERTONHA, R. S.; QUEIROZ, R. F.; FURLANI, C. E. A.; FERNANDES, C. Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks, **Catena**, v. 189, 104505, 2020.
- FOLONI, J.S.S.; LIMA, S.L.; BÜL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:49-57, 2006.
- FORTES, R. et al. A methodology based on apparent electrical conductivity and guided soil samples to improve irrigation zoning. **Precision agriculture**, v. 16, n. 4, p. 441-454, 2015.
- FUKUE, M., MINATO, T., HORIBE, H., TAYA, N.. The microstructure of clay given by resistivity measurements. **Eng. Geol.** 54, 43–53, 1999.
- GARCÍA-TOMILLO, A.; FIGUEIREDO, T. D.; DAFONTE, J. D.; ALMEIDA, A.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT). **Open Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 378-385, 2018.

- GERARD, C.J.; SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agr on. J.*, 74:875-879, 1982.
- GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 32:180- 186, 1968.
- GRIMLEY, D. A.; ARRUDA, N. K.; BRAMSTEDT, M. W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena**, v. 58, n. 2, p. 183-213, 2004.
- GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 2174–2180, 2000.
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: Efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, 6:213-218, 2002.
- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:65-100, 1987.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, 2005. doi: 10.1016/j.still.2004.08.009.
- HERMAN, R. An introduction to electrical resistivity in geophysics. *American Journal of Physics*, v. 69, n. 9, p. 943–952, 2001.
- ISHAQ, M.; IBRAHIM, M.; HASSAN, A.; SAEED, M.; Lal, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.60, n.1, p.153-161, 2001.
- JERABEK, J., ZUMR, D., DOSTAL, T. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. **Soil Tillage Res.** 174, 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.008>, 2017.
- JOSHUA, E. O.; MOKUOLU, A. O. Electrical resistivity based empirical model for predicting cassava plant (TMS 98/0505) tuber yield on sandy-loam soil. **International Journal of Science and Research**, v. 5, p. 1957-1963, 2016.
- KARLEN, D. L. et al. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104365, 2019.
- KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104293, nov. 2019. doi: 10.1016/j.still.2019.104293.
- KIEHL, E. J. Manual de edafologia: Relação solo-água-plantas. São Paulo, **Agronômica Ceres**, 1979. 262p.
- KOTTEK, M., GRIESER, J., BECK, C., RUDOLF, B., RUBEL, F. Mapa mundial da classificação climática Köppen-Geiger atualizado. 2006.
- KOWALCZYK, S., MASLAKOWSKI, M., TUCHOLKA, P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. *J. Appl. Geophys.* 110, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.08.016>, 2014.

- KURTULUS, C.; YEKEN, T.; DURDAG, D. Estimating the Soil Water Content Using Electrical Conductivity, Oven Method and Speedy Moisture Tester. **Eurasian Soil Science**, v. 52, n. 12, p. 1577–1582, 2019.
- LANDIS, J.R., KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, p. 59–174, 1977.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, Eastern Ontario, Canada. **Soil Till**, v.78, 151-170, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.28, p415-423, 2004.
- LONGO, Matteo et al. Soil apparent electrical conductivity-directed sampling design for advancing soil characterization in agricultural fields. **Vadose Zone Journal**, v. 19, n. 1, 2020.
- LUIZ, J.G.; SILVA, L.M. da C. Curso de Geofísica de Prospecção. Belém, UFFa. Centro de Geociências, 1983, 276p.
- LUQUE, E. C. L. **Propriedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179 f. Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.
- MACHADO, P. L. O. A. et al. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p.1023-1031, 2006.
- MAHER, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 137, n. 1-2, p. 25-54, 1998.
- MANTOVANI, Evandro Chartuni. Compactação do solo. 1987. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-55, mar. 1987.
- MAPFUMO, E.; CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A.; BARON, V. S. Forage growth and yield components as influenced by subsurface compaction. **Agronomy Journal**, v. 90, p. 805- 812, 1998.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.49, n.2, p.185-199, 1998.
- MCBRATNEY, Alex B.; SANTOS, ML Mendonça; MINASNY, Budiman. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.
- 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.
- MCQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endo-aquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.63, n.1, p.93-107, 2002.

MEDEIROS, W. N. et al. Apparent soil electrical conductivity in two different soil types. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 49, n. 1, p. 43–52, 2018.

MELO, L. B. B.; SILVA, B. M.; PEIXOTO, D. S.; CHIARINI, T. P. A.; OLIVEIRA, G. C. O., CURI, N. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104876, 2021.

MEROTTO JUNIOR, A; MUNDSTOCK, C. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista brasileira de ciencia do solo. Viçosa. Vol. 23, n. 2 (jun. 1999), p. 197-202**, 1999.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 90-101, 2011.

MOSCÔSO, J. S. C. Compactação do solo. *In: MÜLLER, F. C. et al. Uso, manejo e conservação do solo*. Porto Alegre: SAGAH, 2021. cap. 4, p. 45-58.

NADERI-BOLDAJI, M., SHARIFI, A., HEMMAT, A., ALIMARDANI, R., KELLER, T., 2014. Feasibility study on the potential of electrical conductivity sensor Veris ® 3100 for field mapping of topsoil strength. *Biosyst. Eng.* 126, p. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.006>.

NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modelling. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n. 2, p. 291–309, abr. 2013. doi: 10.1007/s13593-011-0071-8.

ONU. **United nations, department of economic and social affairs**. World Population Prospects 2022 Summary of Results. New York, 2022. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/wpp2022_summary_of_results.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2024.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil Till. Res.**, 46:203-208, 1998.

PENTOS, K.; PIECZARKA, K.; SERWATA, K. The relationship between soil electrical parameters and compaction of sandy clay loam soil. **Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 114, 2021.

PERALTA, N. R.; COSTA, J. L.; BALZARINI, M.; ANGELINI, H. Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 93, n. 2, p.205–218, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/cjss2012-022>.

PORTELA, V. O. **A cobertura com palha pode minimizar a compactação do solo ocasionada pelo tráfego de máquinas agrícolas?**. 2014. Trabalho de Conclusão de curso - Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS. Cerro Largo RS, 2014.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.S.S. & MIRANDA, M .A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesq. Agropec. Bras.**, 35:929- 938, 2000.

RABELLO, L. M.; BERNARDI, AC de C.; INAMASU, R. Y. Condutividade elétrica aparente do solo. Bernardi, ACC; Naime, JM; Resende, AV; Bassoi, LH, p. 48-57, 2014.

RABELLO, L. M.; INAMASSU, R. Y.; TORRE NETO, A.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; MOLIN, J. P. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo adaptado a um implemento agrícola (subsolador). Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. p. 4. (Circular Técnica, 46).

RAMOS, P. V. **Atributos dos solos do Rio Grande do Sul estimados por espectroscopia de refletância difusa e suscetibilidade magnética.** 2019. 75 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **R. Ci. Amb.**, 27:29-48, 2003.

REN, L.; D'HOSE, T.; BORRA-SERRANO, I.; LOOTENS, P.; HANSSSENS, P.; SMEDT, P.; CORNELIS, W. M.; RUYSSCHAERT, G. Detecting spatial variability of soil compaction using soil apparent electrical conductivity and maize traits. **Soil Use and Management**, 2022.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em latossolo do Sudeste e Sul do Brasil. In: Reunião de classificação, correlação de solos e interpretação de aptidão agrícola, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS/SBCS, 1988. p. 233-258.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to Applied Environmental Geophysics.** West Sussex, England: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

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. <https://doi.org/10.1029/2018R G000611>

ROODPOSHTI, H.R., HAFIZI, M.K., KERMANI, M.R.S., NIK, M.R.G., 2019. Electrical resistivity method for water content and compaction evaluation, a laboratory test on construction material. **J. Appl. Geophys.** 168, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.05.015>.

SAMOUELIAN, A., COUSIN, I., TABBAGH, A., BRUAND, A., RICHARD, G., 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. **Soil Tillage Res.** 83, 173–193. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004>.

SANTOS, H. G. D., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C. DOS, et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Solos (2. ed., rev. e amp.) Brasília, DF, 2018.

SANTOS, F. F. L. **Condutividade elétrica aparente do solo determinada pelo método da resistividade utilizando diferentes frequências.** 2020. 66p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG, 2020.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, **Soil Sci. Soc. Am.**, 1989. p.379-438.

SERAFIM, M. E.; OLIVEIRA, G. C. D.; LIMA, J. M. D.; SILVA, B. M.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 362-370, 2013.

- SERRANO, J.; SHAHIDIAN, S.; SILVA, J. M. Spatial and temporal patterns of apparent electrical conductivity: Dualem vs. Veris sensors for monitoring soil properties. *Sensors*, v. 14, n. 6, p. 10024–10041, 2014.
- SEVERIANO, E. C. et al. Structural changes in Latosols of the cerrado region: I-Relationships between soil physical properties and least limiting water range. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 773-782, 2011.
- SILVA, G.J.; MAIA, J.C.S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:31-40, 2006a.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:842- 847, 2006b.
- SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 171p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 24:191-199, 2000a.
- SILVEIRA, A. B., DIAS JUNIOR, M. S., ROCHA, W. W., LEITE, A. M. P., FARIA, V. L., & SANTOS, J. J. (2023). Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos do solo e floresta nativa. **Scientia Forestalis**, 51, e3992. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.24>
- SIQUEIRA, D.S.; MARQUES, J.; MATIAS, S.S.R.; BARRON, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L.C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use Manag.** 2010a, 26, 425–431.
- Soil Science Glossary Terms Committee, & Soil Science Society of America. (2008). Glossary of soil science terms 2008. ASA-CSSA-SSSA.
- SOUZA JÚNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519, 2010.
- SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Atributos físicos de um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, p. 1135-1139, 2005.
- STANCATI, G., NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. Ensaio de laboratório em mecânica dos solos (248 p.). São Carlos: Eesc-USP. 1992.
- STARA. Saiba como a condutividade elétrica auxilia na semeadura à taxa variável, 2021. Disponível em: <<https://stara.com.br/noticias/produtos/saiba-como-a-condutividade-eletrica-auxilia-na-semeadura-a-taxa-variavel>>. Acesso em: 28 dez. 2023.
- STOLF, R.; FERNADES, J.; FURLANI NETO, V.L. Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf: recomendação para seu uso. **STAB**, 1:18-23, 1983
- STOLF, R.; MURAKAMI, J.H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L.G.; SILVA, L. C. F.; MARGARIDO, L.A.C. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.

- SUDDUTH, K. A. et al. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 263-283, 2005.
- SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T. Inversion of soil electrical conductivity data to estimate layered soil properties. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 433–438, 2017.
- SZATANIK-KLOC, A., HORN, R., LIPIEC, J., SICZEK, A., SZEREMENT, J., 2018. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. **Soil Tillage Res.** 175, 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.016>.
- TEIXEIRA, Paulo César et al. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied Geophysics. 2. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, 211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:573-581, 1998.
- TSOULIAS, N. et al. Calculating the water deficit of cherry orchard by means of spatially resolved approach. ASABE 2018 Annual International Meeting. **Anais...**2018.
- VEEN B.W. & BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil Till. Res.**, 16:219-236, 1990.
- VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: Past, present, and future. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 100, n. B2, p. 2175-2192, 1995.
- VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Trans. Am. Soc. Agric. Eng.**, 4:242-246, 1961.
- WADOUX, A. MJ-C.; MCBRATNEY, A. B. Digital soil science and beyond. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, n. 5, p. 1313-1331, 2021.
- WAGNER, W. A. et al. Condutividade elétrica e sua relação com a resistência a penetração do solo visando orientar a escarificação mecânica de sítio-específico em lavoura de soja. In: Revista Plantio Direto & Tecnologia Agrícola (org.). **Condutividade elétrica: Um possível indicador para avaliar a compactação do solo?**. Ed. 161. p. 14- 26. 2018.
- WATANABE, M.; FABRIS, T. R. (Org.). FAO divulga dados sobre a fome no mundo em 2022. 2 ed. OBDESI/UNESC. Criciúma, 2023. Disponível em: <<http://observatorio.unesc.net/upload/estudos/-fao-divulga-dados-sobre-a-fome-no-mundo-em-2022-20230928120418.pdf>>. Acesso em: 2 jan. 2024
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. et al. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal Soil Research**, v. 28, 947-958. 2000.