



**LAURA BEATRIZ BATISTA DE MELO**

**ELECTRICAL RESISTIVITY AND MODIFIED LEAST  
LIMITING WATER RANGE FOR PHYSICAL QUALITY  
ASSESSMENT IN TROPICAL SOILS**

**LAVRAS – MG**

**2020**

**LAURA BEATRIZ BATISTA DE MELO**

**ELECTRICAL RESISTIVITY AND MODIFIED LEAST LIMITING WATER  
RANGE FOR PHYSICAL QUALITY ASSESSMENT IN TROPICAL SOILS**

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 a obtenção do título de Mestre.

Professor Dr. Bruno Montoani Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2020**

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

Melo, Laura Beatriz Batista de.

Electrical resistivity and modified Least Limiting Water Range  
for physical quality assessment in tropical soils / Laura Beatriz  
Batista de Melo. - 2020.

106 p. : il.

Orientador(a): Bruno Montoani Silva.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Manejo do solo. 2. Serviços ecossistêmicos. 3. Citricultura. I.  
Silva, Bruno Montoani. II. Título.

**LAURA BEATRIZ BATISTA DE MELO**

**ELECTRICAL RESISTIVITY AND MODIFIED LEAST LIMITING WATER  
RANGE FOR PHYSICAL QUALITY ASSESSMENT IN TROPICAL SOILS**

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 a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de março de 2020.

Dr. Junior Cesar Avanzi      UFLA

Dr. José Maria de Lima      UFRB

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva  
Orientador

**LAVRAS – MG**

**2020**

*Aos meus pais, José Ronaldo e Carmem.*

DEDICO.

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

A Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) por demais financiamentos.

À EPAMIG Sul em Lavras, pelo apoio logístico, principalmente a pesquisadora Ester Alice Ferreira que permitiu desenvolver o estudo relacionado à citricultura em uma de suas áreas de pesquisa.

Ao produtor Antônio Walter, pela doação da área experimental, disponibilidade de sempre e por seu interesse na pesquisa;

À EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical (CNPMPF) Cruz das Almas, pela doação das mudas utilizadas.

Ao Pedro Benevenuto, por todo o companheirismo dedicado nesse trabalho, obrigada pela dedicação e ajuda em campo e laboratório. Agradeço também os demais auxílios nas disciplinas cursadas durante o mestrado.

À Deus por me conceder o dom da vida e iluminar meu caminho. À Nossa Senhora por sempre passar na frente fazendo com que tudo se encaixasse perfeitamente, e colocar em minha vida pessoas excepcionais, sem as quais, jamais seria possível terminar essa jornada.

Aos meus pais, José Ronaldo e Carmem por não medirem esforços para que todos os meus sonhos se realizassem. Vocês são meu exemplo de trabalho e dedicação. Obrigada por tudo!

Às minhas irmãs Lívia e Letícia por se fazerem sempre presentes, pela paciência, amor e carinho.

Ao Eduardo por todo amor, carinho, companheirismo e compreensão nos momentos de ausência.

Ao professor Bruno Montoani pela orientação, apoio, paciência, confiança e pelos desafios propostos, os quais me tornaram mais forte.

Ao professor Geraldo César de Oliveira, pela orientação e conselhos.

Aos professores José Maria de Lima, Junior Cesar Avanzi e Milson Evaldo Serafim por terem aceito o convite para participar da banca de defesa.

À toda equipe da Física do Solo, alunos de iniciação científica e companheiros da pós-graduação.

Ao Raphael Passaglia, Devison Peixoto e Lucas Castro pelas ajudas de campo, no laboratório, estatística e cafés na nossa salinha.

À Érika Andressa Silva, pela paciência e por ser peça chave para minha carreira.

À Thayná Chiariani, que se tornou mais que meu “braço direito”. Obrigada pelo carinho e amizade.

À Dulce e Dorotéo, técnicos do DCS, pela convivência e ajuda nas análises laboratoriais, trabalhos de campo, e carinho dedicado.

A todos funcionários do DCS/UFLA, em especial ao Pezão pelo carinho, preocupação e ajuda nos trabalhos de campo. À Dirce pelo comprometimento e por estar sempre disposta a ajudar.

Aos amigos de Lavras e Cláudio, por terem tornado essa caminhada mais leve.

À Gabrielly Tavares e Letícia Maciente, companheiras de pós-graduação e da vida, pela amizade e carinho de sempre, pelos cafés na cantina, e auxílio nessa etapa final.

À Ana Maria Ribeiro e Mariângela Oliveira pelos anos de convivência e paciência. Obrigada por cada almoço, pelas conversas jogadas foras e até mesmo pelas lágrimas. Com vocês essas foram menos doloridas.

À Witt O’Brien’s Brasil pela oportunidade de emprego, em especial ao Raphael Oliveira, Ana Luísa Conceição, Elisabete Costa e Arthur Barros pelo apoio na reta final.

## RESUMO GERAL

A utilização de manejos que maximizam a produção agrícola e garantem o fornecimento dos serviços ambientais se torna cada vez mais necessária diante de um cenário em que a demanda por alimentos aumenta, mas os recursos naturais tornam-se escassos. Dentro desse contexto, a avaliação da qualidade física do solo (QFS) por metodologias que se mostrem sensíveis para detectar as alterações torna-se fundamental. Os objetivos são: (i) avaliar a potencialidade do uso da resistividade elétrica ( $\rho$ ) para estimativa da umidade volumétrica ( $\theta$ ) em solos tropicais e (ii) estudar o efeito do manejo conservacionista (preparo profundo e manutenção da entrelinha vegetada com braquiária) na qualidade física e dinâmica de água do solo. O primeiro artigo aborda o uso do método geofísico para estimativa da  $\theta$  em Latossolo, no qual avaliou-se em laboratório a variação da  $\rho$  em função da perda de água em amostras que foram compactadas artificialmente, atingindo crescentes de grau de compactação (GC). No segundo e terceiro artigos avaliou-se como o preparo profundo do solo de um Argissolo, que apresenta uma camada adensada, pode ser benéfico para a dinâmica de água do solo. Além disso, avaliou-se como o uso de diferentes porta-enxertos de *Citrus* pode implicar em alterações nos serviços ambientais devido a modificações na estrutura do solo. Assim, para os dois artigos os tratamentos constituíram de três porta-enxertos (Cravo Santa Cruz – CSC; Tangerineira “Sunki Tropical” – ST; e Citrandarin Índio – CI) e mata nativa. Para o segundo artigo utilizou-se a  $\rho$  para avaliação da dinâmica espaço-temporal da  $\theta$ , e a partir das imagens geradas foi possível inferir sobre o desenvolvimento radicular e absorção de água pelos porta-enxertos. No terceiro artigo, o conceito de porosidade drenável (PD), que permite compreender sobre o processo de recarga subterrânea, foi incorporada ao Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) a fim de elucidar os impactos do manejo adotado nos aspectos agrícola – a partir da análise de água disponível para planta - e ambiental – por meio da PD. Em ambos os solos estudados, a  $\rho$  mostrou-se como potencial ferramenta, apresentando boa acurácia para a estimativa da  $\theta$ . Após testes de modelos, a relação  $\theta$ - $\rho$  foi em geral melhor descrita pelo modelo potencial. A  $\theta$  mostrou maior influência na  $\rho$  do que a compactação do solo. Dentre os porta-enxertos avaliados, o CSC foi o que apresentou maior absorção de água, devido a maior distribuição do sistema radicular. O preparo profundo do Argissolo foi benéfico para a QFS, pois favoreceu a redistribuição de água no perfil do solo, evidenciado pela menor  $\theta$  nas camadas mais profundas nos tratamentos que não foram submetidos às operações de preparo. Além disso, possibilitou boa qualidade física ao desenvolvimento das plantas, uma vez que, em nenhum caso amostrado, a  $D_s$  média ficou acima daquela considerada crítica.

**Palavras-chave:** Manejo do solo. Dinâmica de água no solo. Citricultura. Umidade do solo. Serviços ecossistêmicos.



## ABSTRACT

The use of management that maximizes agricultural production and guarantee the provision of environmental services is increasingly necessary in the face of a scenario in which the demand for food increases, but natural resources become scarce. Within this context, the assessment of physical soil quality (PSQ) by methodologies that are sensitive to detect changes is essential. The objectives are: (i) to evaluate the potential of using electrical resistivity ( $\rho$ ) to estimate soil moisture ( $\theta$ ) in tropical soils and (ii) to study the effect of conservationist management (deep tillage and maintenance of vegetated inter row with brachiaria) on the physical quality and water soil dynamic. The first article discusses the use of the geophysical method for estimating  $\theta$  in Oxisol, in which the variation of  $\rho$  in terms of water loss in samples that were artificially compacted reaching increasing degree of compaction (DC) was evaluated in the laboratory. In the second and third article, it was evaluated how the deep soil preparation of an Ultisol, which presents a dense layer, can be beneficial for the soil water dynamics. In addition, it was evaluated how the use of different *Citrus* rootstocks can imply changes in environmental services due to changes in soil structure. Thus, for both articles, the treatments consisted of three rootstocks (Cravo Santa Cruz - CSC; Mandarin "Sunki Tropical" - ST; and Citrandarin Índio - CI) and native forest. For the second article,  $\rho$  was used to assess the spatial-temporal dynamics of  $\theta$ , and from the generated images it was possible to infer about root development and water absorption by rootstocks. In the third article, the concept of drainable porosity (DP), which allows understanding about the underground recharge process, was incorporated into the Least Limiting Water Range (LLWR) in order to elucidate impacts of the management adopted in the agricultural aspects - by water analysis available for plant - and environmental - through the DP. In both studied soils,  $\rho$  proved to be a potential tool, presenting good accuracy for estimating  $\theta$ . After model tests, the  $\theta$ - $\rho$  relationship was generally better described by the potential model. The  $\theta$  showed greater influence on  $\rho$  than soil compaction. Among the rootstocks evaluated, the CSC was the one with the highest water absorption, due to the greater distribution of the root system. The deep tillage of the Ultisol was beneficial for the PSQ, as it favored the redistribution of water in the soil profile, evidenced by the lower  $\theta$  in the deepest layers in treatments that were not subjected to preparation operations. In addition, it enabled good physical quality to the development of the plants, since in no case sampled, the average Ds was above that considered critical.

**Keywords:** Soil management. Soil water dynamics. Citriculture. Soil moisture. Ecosystem services.

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	11
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	11
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	14
<b>SEGUNDA PARTE: ARTIGOS</b> .....	17
<b>ARTIGO I - Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in weathered tropical soil</b> .....	18
<b>ARTIGO II - O uso eficiente da água do solo pelo Citrus depende do seu porta-enxerto e preparo profundo dos sulcos em solo adensado?</b> .....	50
<b>ARTIGO III - Porosidade drenável incorporada ao Intervalo Hídrico Ótimo para avaliação de manejo conservacionista em Argissolo</b> .....	78

## **PRIMEIRA PARTE**

### **1. INTRODUÇÃO GERAL**

O solo é uma variável chave para a produção de água, produção agrícola, energia, clima e biodiversidade (MCBRATNEY; FIELD; KOCH, 2014). Logo, impactos no solo acarretarão em alterações nas funções desempenhadas por ele, e conseqüentemente nos serviços ambientais (BUSARI et al., 2015; MCBRATNEY; FIELD; KOCH, 2014; MONTANARO et al., 2017; SILVA et al., 2015a; VOGEL et al., 2018). Historicamente, um bom manejo do solo era aquele que promovia maior produção agrícola. No entanto, com a mudança de paradigmas nas últimas décadas o bom manejo passou a ser considerado aquele que, além de garantir a produção agrícola também garante a qualidade física do solo (QFS), da água e o fornecimento dos serviços ambientais a ele associados (ROBINSON et al., 2012).

Nesse contexto, pode-se destacar os sistemas de manejos em que utiliza-se o preparo profundo do solo, o qual facilita o desenvolvimento das raízes propiciando maior rendimento das culturas, aumento da porosidade total, diminuição da densidade e da resistência do solo à penetração, o que conseqüentemente promoverá melhoria nas condições de aeração, infiltração, distribuição de água no perfil do solo suprimento para as plantas e recarga de lençol (BANWART, 2011; MORAES et al., 2016; PIKUL; AASE, 2003; SCHNEIDER et al., 2017; SERAFIM et al., 2013; SOUZA et al., 2004). No entanto, a forma como os solos reagem às mudanças a eles impostas depende de uma multiplicidade de processos físicos, químicos e biológicos interativos (VOGEL et al., 2018).

Além do efeito da ação física do revolvimento em maiores profundidades, é importante considerar também a influência dos sistemas radiculares das plantas na estruturação do solo (ALMEIDA et al., 2018; KIHARA et al., 2012; PRANDO et al., 2010; SILVA et al., 2016). Nesse sentido, o desenvolvimento diferenciado de sistemas radiculares pode acarretar em diferentes condições de estrutura do solo, que serão favoráveis ou não à conservação do solo, produtividade das culturas e estabilização da disponibilidade de água.

Dessa forma, a adoção de sistemas de produção que permitam atingir o equilíbrio entre a perspectiva agrícola e a ambiental torna-se um desafio para os usuários e cientistas do solo (PRADO et al., 2016). Dentro desse contexto, ambas as visões têm em comum a importância da umidade do solo ( $\theta$ ) no sistema solo-planta-atmosfera (DINGMAN, 1994, 2002), uma vez que esta regula a produção das lavouras, define o cronograma das operações mecanizadas (PEIXOTO et al., 2019), permite o uso mais eficiente dos recursos hídricos em áreas irrigadas

(SAKAI et al., 2015) e se relaciona com os serviços ecossistêmicos (ADHIKARI; HARTEMINK, 2016; MCBRATNEY; FIELD; KOCH, 2014).

A coleta de amostras em campo para avaliação da  $\theta$  usando o método padrão termogravimétrico (método da estufa), é uma tarefa difícil, especialmente diante da necessidade de avaliar grandes áreas e em diferentes profundidades. Nesse sentido, o uso de outras técnicas, devidamente calibradas com o método padrão, vêm sendo estudas ao longo dos anos, dentre as quais pode-se destacar o uso da resistividade elétrica do solo ( $\rho$ ) como ferramenta alternativa para medição da  $\theta$  *in situ*. A medição da  $\rho$  se dá pela injeção de correntes elétricas ao solo através de dois eletrodos (A e B) e medição das diferenças de potencial resultantes por meio de outros dois eletrodos (M e N) (ROBINSON et al., 2008; SAMOUËLIAN et al., 2005).

A  $\rho$  é função de várias propriedades do solo incluindo a estrutura, que é relacionada à densidade, porosidade, distribuição de tamanho de poros e sua conectividade, umidade do solo, teor de matéria orgânica e mineralogia do solo (JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017; KOWALCZYK; MAŚLAKOWSKI; TUCHOLKA, 2014; ROMERO-RUIZ et al., 2018; SAMOUËLIAN et al., 2005). Logo, a  $\rho$  pode ser usada para estimar a  $\theta$  em campo, desde que sejam estimados modelos que descrevem a relação  $\theta$ - $\rho$  por meio de calibrações realizadas em laboratório a partir do método padrão (SAMOUËLIAN et al., 2005).

Assim, a  $\rho$  mostra-se como potencial ferramenta para avaliar a variação da  $\theta$  no tempo e no perfil do solo (CONSOLI et al., 2017; SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009; VANELLA et al., 2018), e identificar variações na estrutura devido à compactação (GARCÍA-TOMILLO et al., 2018; JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017). No entanto, estudos em que se utilizou da  $\rho$  para avaliação da qualidade de solos desenvolvidos sob clima tropical ainda são incipientes. Nesse sentido, pode-se destacar o trabalho realizado por Garcia-Montiel et al. (2008) que realizaram avaliações temporais da  $\theta$  por meio da  $\rho$  em Latossolo do Cerrado brasileiro e verificaram que a aplicação da técnica permitiu um entendimento mais claro da dinâmica da absorção de água pelas plantas ao longo do tempo e no perfil do solo, além de características do solo na estratificação das fitofisionomias ambiente do cerrado.

O solo é o principal reservatório de água para as culturas. A quantificação da disponibilidade de água pode ser um indicador da qualidade física do solo (SILVA et al., 2015b). Muitas ferramentas e conceitos para avaliação da quantidade de água disponível para planta foram propostos, a exemplo de Letey (1985). Nesse sentido, o conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi introduzido na ciência do solo a partir da década de 90 (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Ele permite identificar se as limitações para as plantas estão relacionadas à aeração, resistência mecânica ou potencial hídrico. A fim de estudar outras variáveis-chave no

sistema solo-planta-atmosfera, adaptações foram realizadas no IHO, a exemplo de Silva et al. (2015b). No entanto, ainda são necessárias adequações que permitam associar os parâmetros ambientais às variáveis agronômicas.

Diante do exposto, essa dissertação foi dividida em duas partes: a primeira constitui-se da introdução geral, que contextualiza a temática em estudo, e a segunda é composta por três artigos. O primeiro artigo aborda o uso da resistividade elétrica para estimativa da umidade volumétrica ( $\theta$ ) em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (SANTOS et al., 2018) – correspondente a Typic Hapludox (SOIL SURVEY STAFF, 2014) - de textura argilosa, desenvolvido sob condições tropicais, e verificar como a relação  $\theta$ - $\rho$  difere dos solos de clima temperado. Além disso, o artigo também avalia a influência da estrutura do solo na relação  $\theta$ - $\rho$ , a partir da realização de leituras em amostras com crescentes graus de compactação.

O segundo e terceiro artigos tratam da adoção do manejo conservacionista, constituído pelo preparo profundo do solo e manutenção da entrelinha vegetada com braquiária, em um pomar de *Citrus* instalado sob Argissolo Vermelho distrófico típico (SANTOS et al., 2018) – correspondente a Typic Hapludult (SOIL SURVEY STAFF, 2014) - localizado no município de Perdões, na mesorregião Oeste de Minas Gerais. As limitações da camada adensada típica dessa classe de solos podem ser abrandadas a partir da utilização dessas práticas. Assim, com estes estudos, destaca-se a importância de conhecer o efeito da ação física do revolvimento do solo em maiores profundidades para cultivos perenes, a fim melhorar a qualidade física do solo influenciando assim no desenvolvimento das plantas e fornecimento dos serviços ambientais. Além disso, a influência do uso de diferentes porta-enxertos nas propriedades físicas foi avaliada em ambos trabalhos.

Dessa forma, com o segundo artigo buscou-se avaliar a dinâmica espaço-temporal da umidade do solo ao longo do ano por meio da resistividade elétrica, foi realizado um estudo em laboratório para determinação de equação que descreve a relação entre  $\theta$  e  $\rho$  para o Argissolo estudado. Além disso, a partir das imagens produzidas, procurou-se inferir sobre o desenvolvimento radicular e absorção de água pelos porta-enxertos, e verificar a influência do uso de diferentes porta-enxertos na dinâmica de água do solo.

No terceiro artigo, o conceito de porosidade drenável (PD) foi incorporada ao IHO, a fim de elucidar impactos nos aspectos agrícola e ambiental do manejo adotado. Dessa forma buscou-se avaliar a influência do manejo do solo na QFS e no serviço ambiental de recarga de água subterrânea. Além disso, objetivou-se verificar a influência do uso de diferentes porta-enxertos na QFS e avaliar se os valores de densidade do solo que limitam o crescimento vegetal são os mesmos que limitam o processo de recarga subterrânea.

## REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services - A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101–111, 2016.
- ALMEIDA, W. S. DE et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130–138, 2018.
- BANWART, S. Save our soils. **Nature**, v. 474, n. 7350, p. 151–152, 2011.
- BUSARI, M. A. et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, p. 119–129, 2015.
- CONSOLI, S. et al. Partial root-zone drying irrigation in orange orchards: Effects on water use and crop production characteristics. **European Journal of Agronomy**, v. 82, p. 190–202, 2017.
- DINGMAN, S. L. **Physical Hydrology**. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- GARCIA-MONTIEL, D. C. et al. Estimating seasonal changes in volumetric soil water content at landscape scales in a Savanna ecosystem using two-dimensional resistivity profiling. **Earth Interactions**, v. 12, n. 2, p. 1–25, 2008.
- GARCÍA-TOMILLO, A. et al. Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT). **Open Agriculture**, v. 3, p. 378–385, 2018.
- JEŘÁBEK, J.; ZUMR, D.; DOSTÁL, T. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, v. 174, n. August, p. 231–240, 2017.
- KIHARA, J. et al. Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya. **Applied Soil Ecology**, v. 58, p. 12–20, 2012.
- KOWALCZYK, S.; MAŚLAKOWSKI, M.; TUCHOLKA, P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. **Journal of Applied Geophysics**, v. 110, p. 43–50, 2014.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science. Soil Sci.**, v. 1, p. 277–294, 1985.
- MCBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, v. 213, p. 203–213, 2014.
- MONTANARO, G. et al. Orchard management, soil organic carbon and ecosystem services in Mediterranean fruit tree crops. **Scientia Horticulturae**, v. 217, p. 92–101, 2017.
- MORAES, M. T. et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351–362, 2016.

- PEIXOTO, D. S. et al. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 194, n. March, p. 104307, 2019.
- PIKUL, J. L.; AASE, J. K. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 859–866, 2003.
- PRADO, R. B. et al. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1021–1038, 2016.
- PRANDO, M. B. et al. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 693–700, 2010.
- ROBINSON, D. A. et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358–389, 2008.
- ROBINSON, D. A. et al. Natural capital, ecosystem services, and soil change: Why soil science must embrace an ecosystems approach. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 1, 2012.
- ROMERO-RUIZ, A. et al. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. **Reviews of Geophysics**, v. 56, p. 672–697, 2018.
- SAKAI, E. et al. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 148, p. 16–23, 2015.
- SAMOUËLIAN, A. et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, p. 173–193, 2005.
- SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.
- SCHNEIDER, F. et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 193–204, 2017.
- SERAFIM, M. E. et al. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 362–370, 2013.
- SILVA, A. H. et al. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: PARRON, L. M. et al. (Eds.). **Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica**. Brasília: Embrapa, 2015a. p. 71–83.
- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775–1781, 1994.
- SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103–113, 2015b.
- SILVA, É. A. et al. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method

and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3894–3903, 2016.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, 2014.

SOUZA, L. D. et al. Avaliação de plantas cítricas, em diferentes profundidades de plantio, em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 2, p. 241–244, 2004.

SRAYEDDIN, I.; DOUSSAN, C. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. **Plant and Soil**, v. 319, p. 185–207, 2009.

VANELLA, D. et al. Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 310–324, 2018.

VOGEL, H. J. et al. A systemic approach for modeling soil functions. **Soil**, v. 4, n. 1, p. 83–92, 2018.



## **SEGUNDA PARTE: ARTIGOS**

## ARTIGO I

### **Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol**

(Formatado de acordo com a versão submetida ao periódico Soil and Tillage Research)

**Abstract:** Geophysical methods that allow determination of soil electrical resistivity ( $\rho$ ) make estimates of the space-time variation of soil water content ( $\theta$ ) viable, as well as of other important physical properties, such as soil structure. The aims of this study were to test models for the  $\theta$ - $\rho$  relationship in a Typic Hapludox with clay texture under tropical conditions, and to determine the effect of the degree of compaction on this relationship. Undisturbed samples were collected and, in the laboratory, after saturation, they were artificially compacted to obtain different degrees of compaction (DC): 76% (control), 84%, 90%, and 94%. Readings of resistivity were made simultaneous to weighing of the samples for determination of  $\theta$ . The power ( $\theta = a\rho^b$ ), exponential ( $\theta = a\exp(\rho b)$ ), and logarithmic ( $\theta = a + b\log_{10}(\rho)$ ) models were tested. The power model (“Archie’s Law”) best described the  $\theta$ - $\rho$  relationship ( $R^2 = 0.77$ ;  $p < 0.05$ ), differing from what was expected from the literature for clay soils. The coefficients were different from those reported for temperate climate soils, resulting in lower  $\rho$  values as the soil dries. Furthermore, the  $\theta$ - $\rho$  relationships were affected by the DC of the soil; however, the logarithmic model allowed the best differentiation of these effects. The logarithmic model showed that the  $\theta$ - $\rho$  relationship has two patterns, depending on  $\theta$ : pattern A when  $\theta > 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  and pattern B for  $\theta < 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Pattern A showed that compaction led to higher values of  $\theta$  for the same value of  $\rho$ ; and in pattern B, the opposite occurred. Simultaneously modeling  $\rho$  in accordance with the DC and with the degree of saturation (DS) showed that  $\theta$  has a greater effect on  $\rho$  than soil compaction does. Thus, measurement of  $\rho$  proved to be a tool of good

accuracy for estimation of  $\theta$  under weathered tropical soil conditions after calibration. However, we suggest that diagnosis of soil compaction be performed under drier soil conditions to eliminate the preponderant effect of  $\theta$ .

**Keywords:** soil structure; geophysical methods; weathered tropical soil; water content modelling

## 1 Introduction

Although it represents only 0.05% of the global hydrological cycle and 0.15 % of the fresh water available in the world, soil water content ( $\theta$ ) is a key variable in the soil-plant-atmosphere system (Dingman, 2002, 1994). Crop production is regulated by  $\theta$ , and water has a considerable effect on the biogeochemical processes of the soil. Water also acts as the main ways of transporting nutrients to plants and interrelates with availability of air, heat, and mechanical resistance for plant roots (Boone, 1988; DaMatta and Ramalho, 2006; Letey, 1985; Robinson et al., 2008; Silva et al., 2019). In addition, controlling  $\theta$  determines the timeline of mechanized operations in crop areas, helps to define the best time for traffic of machinery, avoiding wetting condition, to prevent soil compaction (Ajayi et al., 2013; Peixoto et al., 2019). Control of  $\theta$  also allows more efficient use of water resources in irrigated areas (Rios et al., 2013; Sakai et al., 2015), besides being related to ecosystem services (Adhikari and Hartemink, 2016). It is fundamental for adequately understanding and managing soil and water natural resources.

The  $\theta$  may be estimated by measurements in the field (*in situ*), by sensors (for example, Time Domain Reflectometry – TDR and Frequency Domain Reflectometry - FDR), by remote sensing techniques and by models that simulate soil water balance (Calamita et al., 2012; Robinson et al., 2008). The standard method for determining this parameter is the laboratory oven method, from collecting soil samples in the field. Evaluation of  $\theta$  using the standard method is a difficult task, especially in large areas, and even more at different soil depths. In addition, since standard method is destructive, expensive, labor intensive, and time consuming, it has become necessary to use new techniques to better measure  $\theta$  in space and time with low soil disturbance and yet with great accuracy (Brillante et al., 2015). Therefore, indirect measurement methods, mainly based on soil electrical properties, have been adopted more frequently in recent years (Calamita et al., 2012; Robinson et al., 2008).

In this context, soil electrical resistivity ( $\rho$ ) has been used for estimating  $\theta$  (Calamita et al., 2012; Celano et al., 2011; Dick et al., 2018; Ma et al., 2014; Michot et al., 2003). Electrical resistivity depends on various soil properties, including structure, which is related to bulk density, porosity, pore size distribution, pore connectivity, and soil water content (Jeřábek et al., 2017; Kowalczyk et al., 2014; Romero-Ruiz et al., 2018; Samouëlian et al., 2005). The scheme below shows the influence of some soil properties on increasing electrical resistivity (Figure 1). Soil compaction is mainly characterized by increased soil bulk density and reduced macroporosity. Therefore, compacted soils should have lower values of electrical resistivity of the soil. In this way,  $\rho$  can be used to estimate  $\theta$ , including evaluation on large areas (Zhu et al., 2007). It also is a promising tool for identification of differences in structure due to soil compaction (García-tomillo et al., 2018; Jeřábek et al., 2017).

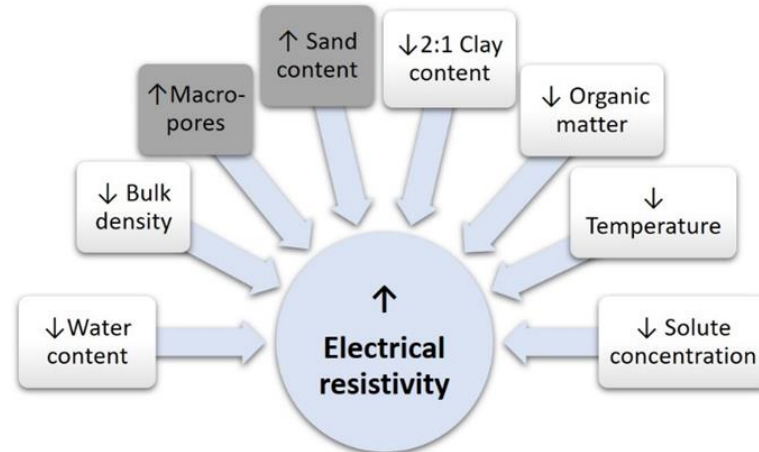


Figure 1. Relationship of electrical resistivity to soil properties and characteristics. Source: Samouëlian et al. (2005).

Another important aspect of this method is the possibility of information regarding soil attributes at different depths (Robinson et al., 2008; Zhu et al., 2007), which allows to study spatial variations in both the horizontal and vertical direction. Using this property also allows

to monitoring variations of  $\theta$  on a time scale, since among the variables that affect resistivity, this is the only one that significantly varies in a short period of time, allowing for mapping  $\theta$  at different times of the year (Alamry et al., 2017). However, measurements of  $\rho$  directly in the field and to estimate  $\theta$  *in situ* need to be calibrated with the standard method (Samouëlian et al., 2005).

In the literature, studies points to a non-linear and inverse  $\theta$ - $\rho$  relationship, i.e., the greater the  $\rho$ , the lower the  $\theta$  (Alamry et al., 2017; Brunet et al., 2010; Calamita et al., 2012; Celano et al., 2011; Garcia-Montiel et al., 2008; Seladji et al., 2010). The analytical form of the semi-empirical equation, known as “Archie’s Law” (Archie, 1942), has been one of the main ways of modeling the  $\theta$ - $\rho$  relationship, although it may not be suitable for clay soils (Calamita et al., 2012). Clay minerals strongly affect the electrical transmission mechanism of the soil, as they play an important role in the electrical conductance of the soil. The clay particles, because they are small, present a large specific surface area, being characterized by a higher density of charges (Calamita et al. 2012, Seladji et al., 2010).

Nevertheless, studies for determination of the  $\theta$ - $\rho$  relationship are still in the beginning stages for different soil conditions (Brunet et al., 2010), especially under tropical conditions. The soil structure, which directly affects the water retention process and the transmission of electrical current in the soil (Samouëlian et al., 2005), is strongly affected by changes in the climate (Hillel, 2003). Therefore, the structure of soils developed in a tropical climate should be different from that of temperate soils, in relation to soil density, pore size distribution, which will strongly influence the  $\theta$ - $\rho$  relationship. Due to the advanced degree of weathering, which is due to the high temperatures, intense leaching of bases and silica and accumulation of iron and aluminum, of the Oxisols of southeastern Brazil, the mineralogical constituents responsible for the development of the structure of these soils are kaolinite (clay mineral 1:1) and gibbsite

(aluminum oxide) (Ferreira et al., 1999a; Kämpf et al., 2012). Temperate soils, as they are less weathered, have a higher concentration of primary minerals and 2:1 clay minerals.

For a vertically heterogeneous soil, the accuracy of the  $\theta$ - $\rho$  relationship is affected by soil bulk density, as indicated by Hadzick et al. (2011). According to the authors, this effect needs to be checked in undisturbed soil samples under controlled conditions, which has not yet been greatly examined in the literature (Romero-Ruiz et al., 2018). Seladji et al. (2010) recommended that monitoring of soil compaction using  $\rho$  be done with soil in a dry state. According to these authors, the  $\rho$  is sensitive to increase in bulk density when water content is lower than 0.25 g g<sup>-1</sup>. However, some difficulties have arisen in evaluation of the  $\rho$  in drier soil conditions, especially in forest soils, due to the high soil spatial variability (Seladji et al., 2010).

Therefore, the hypotheses of this study are: (i) “Archie’s Law” is not suitable for explaining the  $\theta$ - $\rho$  relationship in tropical and weathered – intensely leached - clay soil, and (ii) different degrees of compaction affect soil structure and lead to different patterns in the  $\theta$ - $\rho$  relationship. Thus, the aim of this study were: (i) to model the  $\theta$ - $\rho$  relationship in a clay Typic Hapludox under tropical conditions and determine how this relationship differs from the relationship in temperate climate soils and (ii) to evaluate the effect of soil structure on the  $\theta$ - $\rho$  relationship with increasing degrees of compaction.

## **2 Materials and Methods**

### **2.1 Soil sampling and sample preparation**

The sampling location was on the campus of the Federal University of Lavras - UFLA, in Lavras, Minas Gerais, Brazil, in an experimental area growing coffee (geographic coordinates 21°13'37”S and 44°57'40”W and altitude of 975 MASL). The area has been cultivated with coffee since 2003 and in 2016 a new coffee crop was implanted with furrow opening at approximately 0.30 m of depth. According to the Köppen classification, climate in

the region is Cwb, with cold, dry winters and hot, humid summers. Mean temperature is 18.7°C and mean annual rainfall is 1621 mm (Alvares et al., 2014).

The soil was classified as Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 2014), according to detailed mapping (Curi et al., 2017). Oxisols are the predominant soils in Brazil, corresponding to 33% of the country (IBGE, 2019). Soil structure tends to have microgranular structure, being granules composed by clay fraction flocculation. The A horizon has 42% clay, 45% sand, and 13% silt; the B horizon has 44% clay, 35% sand, and 21% silt; and the C horizon has 29% clay, 39% sand, and 32% silt. Soil chemical and physical characterization are presented in Table 1.

Table 1. Soil chemical and physical characterization.

Depth	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	pH	K <sup>+</sup>	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CEC	SOM	BS	Clay	Sand	Silt
m	-----g kg <sup>-1</sup> -----				mg dm <sup>-3</sup>		---- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ----				----- % -----			
0-0.20	159	198	42	5.0	104	4.5	1.5	0.5	5.7	2.1	40	42	45	13
0.20-0.40	175	288	58	4.6	48	1.4	0.5	0.2	5.1	1.3	16	44	35	21

Oxides are results of sulfuric acid digestion of soil. CEC = cations exchange capacity at pH 7.0; SOM = soil organic matter; BS = base saturation. Source: Silva (2019).

Twelve undisturbed soil samples were collected in rigid plastic cylinders of 0.10 m diameter and 0.10 m height. They were removed from the surface layer (0 - 0.10 m) near the coffee plant row. The use of cylinders filled with soil under laboratory conditions has already been successfully used in other studies (Hadzick et al., 2011; Michot et al., 2003), and the results are better when the soil structure is preserved (Brillante et al., 2015). In the laboratory, the samples were prepared to remove excess soil at the upper and bottom side of the cylinder, and they were then slowly saturated with distilled water, through capillarity, over a minimum period of 72 hours.



After that, the samples were artificially compacted with the aid of a manual hydraulic press in order to obtain different conditions for soil structure in accordance with different degrees of compaction (DC), calculated according to equation 1. The samples were then divided into four groups, with three replications each, according to the DC attained, as shown in Table 2. It is noteworthy that group 1 (DC = 76%) represents the current soil condition, that is, there is no additional compaction.

$$Bd = DC \times Bd_{ref} \quad (1)$$

where  $Bd$  is soil bulk density ( $g\ cm^{-3}$ );  $DC$  is degree of compaction (decimal); and  $Bd_{ref}$  is reference bulk density ( $g\ cm^{-3}$ ) achieved through a uniaxial compressed test with a load of 200 kPa, calculated according to the pedotransfer function ( $Bd_{ref} = -0.00052\ clay + 1.73138$ ) elaborated by Reichert et al. (2009).

Table 2. Mean values of soil bulk density ( $Bd$ ), degree of compaction ( $DC$ ), and total pore volume ( $TPV$ ) for the four groups evaluated.

Group	DC (%)	$Bd$ ( $g\ cm^{-3}$ )	$TPV$ ( $m^3\ m^{-3}$ )
1	76	1.20	0.481
2	84	1.32	0.482
3	90	1.40	0.473
4	94	1.48	0.447

### 2.3 Description of the calibration trial in the laboratory

Soil electrical resistivity is measured by injection of electric currents in the soil through two electrodes (electrode A and B) along with measurement of resulting potential differences by means of two other electrodes (called M and N) (Robinson et al., 2008; Samouëlian et al., 2005). Resistivity readings were taken with the resistivity meter X5xtal 250 (Auto Energia, Minas Gerais, Brazil), with the aid of two multimeters. The trial was conducted in a Wenner array (Samouëlian et al., 2005), unidimensional, with four electrodes arranged in the order A

M N B, spaced at 0.019 m from each other (Figure 2a) and inserted at a penetration depth of 0.05 m. Three readings (replicates) were made on each sample once a day for 25 days, the samples being dried by evaporation (air drying) until the 24<sup>th</sup> day and on the last day dried in a forced circulation oven at 60° C. Electrical resistivity of water was considered constant during the process. The  $\rho$  was calculated as follows (equation 2):

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

where a is the separation of electrodes (m); b is the penetration depth (m);  $\Delta V$  is potential difference due to application of electric current (mV); and I is injected electric current (mA).

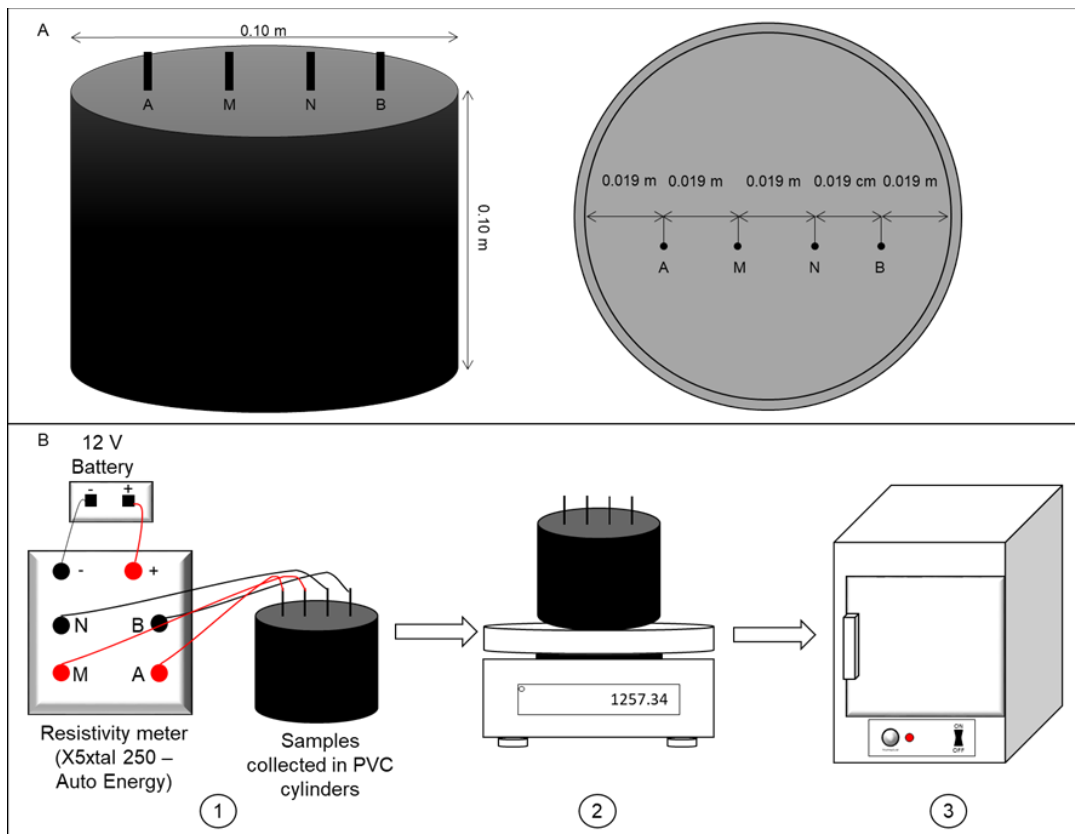


Figure 2. (A) Undisturbed soil cylinders with electrode arrangement and spacing from side (left) and top view (right). (B) Flowchart of the measurement process: 1) Measurement of electrical resistivity; 2) daily weighing of samples over a period of 25 days (air-drying); 3) At day 25: oven drying of samples at 105 – 110 °C.

For each reading, the samples were weighed with the aim of calculating soil water content at the time of analysis. At the end of the last day of reading, the samples were maintained in a laboratory oven at 105-110°C for 48 h for determination of soil dry matter (Blake and Hartge, 1986). The  $\theta$  was obtained by the  $\theta = U(Bd/Dw)$  relation, where U is gravimetric water content ( $\text{kg kg}^{-1}$ ); Bd is soil bulk density ( $\text{g cm}^{-3}$ ); and Dw is water density (considered to be  $1 \text{ g cm}^{-3}$ ). Figure 2b shows a simplified diagram of the process of obtaining data.

## 2.4 Statistical analyses

The data of  $\theta$  in relation to  $\rho$  of each replication (mean value of three replicates) for each DC were plotted, and a non-linear tendency was found for all of them, which corroborates other studies in the literature (Besson et al., 2010; Brillante et al., 2015; Calamita et al., 2012; Celano et al., 2011; Samouëlian et al., 2005) in which there is also a record for tropical soils (Ferreira et al., 2007; Garcia-Montiel et al., 2008). Thus, the data of  $\theta$  in accordance with  $\rho$  were fitted using three different fitting models: power (equation 3), exponential (equation 4), and logarithmic (equation 5), that are considered suitable according to the literature on previous studies. It should be noted that resistivity values less than 1 were not considered for fitting the models.

$$\theta = a\rho^b \quad (3)$$

$$\theta = a\exp(\rho b) \quad (4)$$

$$\theta = a + b \log_{10}(\rho) \quad (5)$$

where a and b are fitting parameters of the models.

It should be noted that equation 3 has the same analytical form as the semi-empirical  $\theta$ - $\rho$  relationship known as “Archie’s Law” (Archie, 1942), which might not be suitable for clay soils (Calamita et al., 2012).

To check the accuracy of the  $\theta$ - $\rho$  models, the coefficient of determination ( $R^2$ ) and also the root mean square error (RMSE) were used between the observed values and predicted values of  $\theta$ . Lower values of RMSE are desired because they indicate better fit of the models. In addition, the t test was applied to evaluate the significance of the two parameters estimated, and the confidence interval (CI) was calculated for the parameters of the models obtained. The quality of the fit was also compared based on the Akaike Information Criterion (AIC), that have a strong theoretical mathematical basis and define the best model as that which has the lowest AIC value (Akaike, 1974). According to Burnham and Anderson (2002), for a model to be considered better than another, the difference between their AIC values must be greater than 2 units, but if the difference is less than that, the two models exhibit the same performance.

Two additive models were also fitted using all the data – the first describes  $\rho$  according to the degree of compaction (DC) and the degree of saturation (DS) of the soil ( $\log\rho = \alpha + \beta_{DC}DC + \beta_{DS}DS$ ), and the other predicts DS according to  $\rho$  and the DC ( $DS = \alpha + \beta_{\rho}\log\rho + \beta_{DC}DC$ ). For the two models, the  $\rho$  values used underwent logarithmic transformation to allow better fit of the models. The DS was calculated by the ratio between  $\theta$  and TPV determined in the laboratory as the  $\theta$  in saturation.

Pearson correlation was performed among the parameters of the model of best fit, DC, Bd, TPV, and  $\rho$ . All the statistical procedures and estimates were made using the statistical software R 3.5.2 (R Core, 2018), and the packages used were nlstools (Baty et al., 2015) for fitting models 3, 4, and 5; corrplot (Wei and Simko, 2017) for the study of correlation; and stats (R Core, 2018) for fitting of the additive models.

### 3 Results and Discussion

#### 3.1 Modeling of the $\theta$ - $\rho$ relationship in tropical soil

With the aim of obtaining a calibration function to estimate soil water content from electrical resistivity under current soil conditions, the  $\theta$  and  $\rho$  data in reference to group 1 (DC = 76%, natural soil condition without additional compaction) were fitted to the three models proposed with their fitting parameters shown in Table 3, and the  $\theta$ - $\rho$  relationships modeled are plotted in Figures 3A, 3B, and 3C. It should be noted that for better visualization of the data, the resistivity axis is shown on a logarithmic scale.

The  $a$  and  $b$  fitting parameters were significant ( $p < 0.001$ ) for the three models fitted. Nevertheless, the parameters of the power and logarithmic models were below the range of values reported in studies conducted in temperate climate countries and in soils of sandy and silty texture (Al Hagrey et al., 2004; Calamita et al., 2012; Celano et al., 2011). In relation to the exponential model, the values of the parameters found were higher than those observed by Zhu et al. (2007) in soil under temperate climate conditions and sandy texture. Thus, the consideration that the  $\theta$ - $\rho$  relationship is affected by texture and also by soil mineralogy (Abu-Hassanein et al., 1996; Samouëlian et al., 2005) suggests that our results reflect the specific conditions of soils of tropical climate, particularly in regard to the high clay content, structure (pore-size distribution), and mineralogy of the Typic Hapludox studied. In this regard, Jayawickreme et al. (2010) and Seladji et al. (2010) found different  $\rho$  values for the same  $\theta$  value upon comparing soils of different textural classes. They attributed this to the variation in the contents of clay and organic matter, as they have a large specific surface area and thus high charge density, leading to greater electrical conductivity of the soil samples (Calamita et al., 2012).

Table 3. Fitting parameters for each model (power, exponential, and logarithmic) for Typic Hapludox and clay texture (DC = 76%). n = 73.

	<i>a</i>	SE <i>a</i>	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>a</i> (CI, 95%)	<i>b</i> (CI, 95%)	RMSE (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	R <sup>2</sup>	AIC
Power	0.692	0.048	-0.282	0.021	[0.603 ; 0.794]	[-0.326 ; -0.241]	0.053	0.77	-215.3
Exponential	0.322	0.013	-0.003	0.001	[0.294 ; 0.352]	[-0.004 ; -0.002]	0.074	0.57	-167.4
Logarithmic	0.472	0.018	-0.130	0.009	[0.435 ; 0.508]	[-0.148 ; -0.111]	0.058	0.73	-202.4

n: number of measurement values used for modelling; *a* and *b*: coefficients of the models; SE: standard error of the coefficients; CI, 95%: confidence interval of the coefficients at the level of 95%; RMSE: root mean square error; R<sup>2</sup>: coefficient of determination of the model.

Furthermore, Oxisols in a tropical climate developed under environmental conditions that favor weathering, and thus they have characteristics (such as mineralogy of the clay fraction) with a greater concentration of aluminum oxides (gibbsite) (Kämpf et al., 2012) and soil structure with very large pores and very small pores, with very few intermediate size pores (Resende et al., 2014), unlike those of soils developed under a temperate climate. This has a direct effect on water retention mechanisms in the soil (Ferreira et al., 1999b; Silva et al., 2014) and, thus, on the mechanisms of electrical transmission in the soil, as discussed by Calamita et al. (2012) and Seladji et al. (2010). Two processes explain unsaturated soil water retention. In the first, retention occurs as water films attached to the surfaces of soil solids, due to the adsorption phenomenon, which is a function of texture, organic matter and mineralogy. In the second process, retention occurs in the capillary pores of the soil and can be illustrated by the phenomenon of capillarity, which is a function of the soil structure (Hillel, 2003). Thus, for the same  $\theta$ , soils with different texture/structure have different pore size distribution and, consequently, different degree of saturation, affecting the  $\rho$ .

Comparison of the models shows that the power model led to the lowest RMSE (0.053 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) and highest R<sup>2</sup> (0.77), followed by the logarithmic model (RMSE = 0.058 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> and R<sup>2</sup> = 0.73). The exponential model had the worst fit (RMSE = 0.074 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> and R<sup>2</sup> = 0.57) (Table 3). Calamita et al. (2012) studied the  $\theta$ - $\rho$  relationship measured in the field by TDR sensors and found R<sup>2</sup> values ranging from 0.21 to 0.70 for the linear and power model. In contrast, Celano et al. (2011) found R<sup>2</sup> values higher than 0.81 for the power model.

Although the values of RMSE found in this study are higher than 0.05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, they can be considered acceptable (Calamita et al., 2012) since few readings of resistivity were made when the soil water content was very low. Experimental difficulty in the dry soil condition was also reported by Seladji et al. (2010), who suggest the needs of future theoretical and practical investigations to clarify the  $\theta$ - $\rho$  relationship when the degree of saturation with water is low.

In addition to R<sup>2</sup> and RMSE, the choice of the best  $\theta$ - $\rho$  model can be backed up by more accurate methods, such as the Akaike Information Criterion (AIC). The AIC values (Table 3) indicated that the model that best describes the  $\theta$ - $\rho$  relationship is the power model, which corroborates other studies (Al Hagrey et al., 2004; Calamita et al., 2012). Thus, the power model is the best to describe the  $\theta$ - $\rho$  relationship, shows that the analytical solution of “Archie’s Law” (Archie, 1942), expressed as the power model, was appropriate for the Typic Hapludox studied, even though it is known as more suitable for coarse to medium grained soils (Calamita et al., 2012). The factors that may have contributed to deny the hypothesis (i) of this study are: the significant percentage of sand in this soil (45% in the layer evaluated); low cation exchange capacity (Table 1) of tropical soils, resulting from clay mineralogy with kaolinite, gibbsite, goethite and hematite in different proportions; and microgranular structure of oxidic Oxisols that prevent the face to face arrangement of kaolinite plates (Ferreira et al., 1999a, b; Ajayi et al., 2009), increasing the total porosity, and especially, the macroporosity of these clay soils (Carducci et al., 2014; Silva et al., 2014).

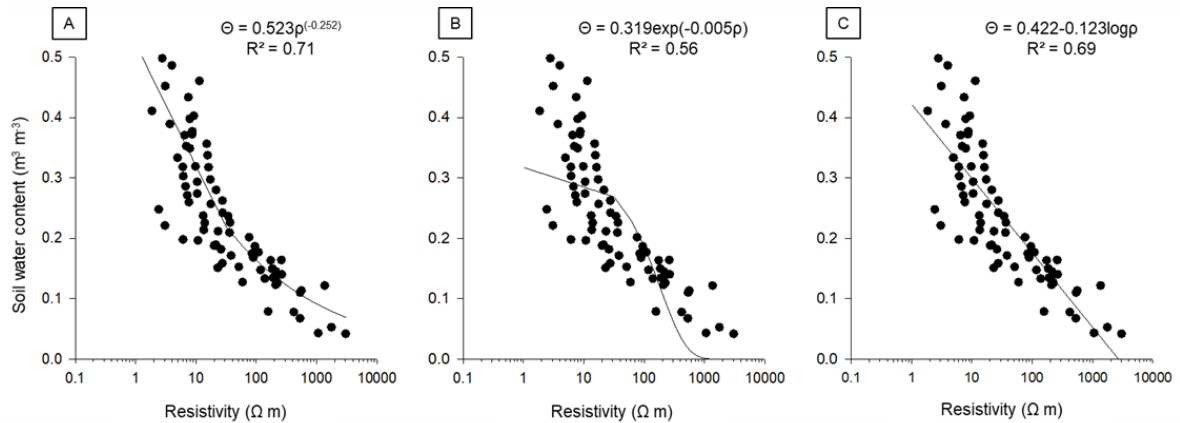


Figure 3. Relationship between soil water content ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) and soil electrical resistivity ( $\Omega \text{m}$ ) for Typic Hapludox of clay texture with an undisturbed structure ( $\text{DC} = 76\%$ ) fitted to three models: (A) power, (B) exponential, and (C) logarithmic.

With the aim of clarifying the differences between the  $\theta$ - $\rho$  relationships for temperate and tropical climate soils, a comparison was made between models obtained for soils under a temperate climate of sandy loam texture (Calamita et al., 2012), loam texture (Al Hagrey et al., 2004), alluvial deposits (Cosenza et al., 2006), and the power model ( $\theta = 0.692\rho^{-0.282}$ ) fitted to the clay Typic Hapludox used in calibration (Figure 4). In all these studies, the samples used for calibration have similar sand contents; however, it should be noted that the soil used in the present study has a higher percentage of clay. In wet soil condition (high degree of saturation) clay Typic Hapludox had  $\rho$  similar to Sandy loam and distinct from Loam and Alluvial deposits. However, in dry soil conditions (low degree of saturation) the reverse is observed (Figure 4).

In the  $0.25$  to  $0.50 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$  soil water content range, the Typic Hapludox, with clay texture, had a lower  $\rho$  value for the same  $\theta$  value compared to the other soils, which can be explained by the higher clay content. Higher clay content has a higher density of surface electrical charges that results in greater electrical conductivity and, therefore, lower  $\rho$  (Calamita et al., 2012). In addition, the higher clay content and its mineralogy results in the formation of a granular structure with many large and small pores and very few pores of intermediate size



(Carducci et al., 2011; Resende et al., 2014), making the Typic Hapludox presents different patterns of  $\rho$  depending on the degree of saturation.

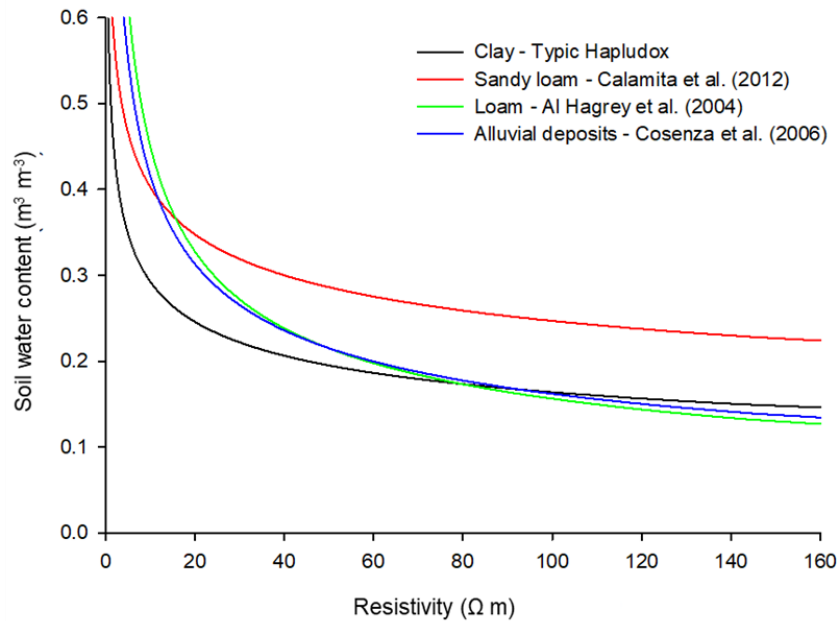


Figure 4. Relationship between soil water content ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) and electrical resistivity ( $\Omega \text{m}$ ) for temperate climate soils (with different soil types and textures) and a tropical soil (Typic Hapludox of clay texture).

### 3.2 Effect of compaction on soil electrical resistivity

The same data analysis performed in section 3.1 for the DC = 76% was performed for the other groups: DC = 84%, 90%, and 94%. The values of the  $a$  and  $b$  fitting parameters, standard error, and confidence interval of the models show similarities and differences among the DC for each model (Table 4). In addition, the  $R^2$  and RMSE values of each equation and degree of compaction are also shown. For all the fitted models, the values of the angular and linear coefficients were statistically significant ( $p < 0.001$ ) and not null, which can be seen by the confidence intervals.

Table 4. Fitting parameters and accuracy indicators for each model (power, exponential, and logarithmic) tested for the  $\theta$ - $\rho$  relationship in accordance with the degree of compaction for a Typic Hapludox with a clay texture.

DC (%)	<i>a</i>	SE <i>a</i>	<i>b</i>	SE <i>b</i>	<i>a</i> (CI, 95%)	<i>b</i> (CI, 95%)	RMSE (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	R <sup>2</sup>	AIC	n
Power										
76	0.692	0.048	-0.282	0.021	[0.603 ; 0.794]	[-0.326 ; -0.241]	0.053	0.77	-215.3	73
84	0.498	0.038	-0.174	0.025	[0.428 ; 0.576]	[-0.224 ; -0.127]	0.088	0.49	-126.0	65
90	0.834	0.063	-0.300	0.023	[0.721 ; 0.967]	[-0.346 ; -0.256]	0.053	0.77	-207.8	70
94	0.963	0.124	-0.324	0.036	[0.755 ; 1.237]	[-0.395 ; -0.257]	0.054	0.73	-134.8	47
Exponential										
76	0.322	0.013	-0.003	0.001	[0.294 ; 0.352]	[-0.004 ; -0.002]	0.074	0.57	-167.4	73
84	0.349	0.017	-0.003	0.001	[0.313 ; 0.387]	[-0.005 ; -0.001]	0.096	0.39	-115.3	65
90	0.394	0.015	-0.006	0.001	[0.363 ; 0.428]	[-0.008 ; -0.004]	0.066	0.65	-176.4	70
94	0.383	0.015	-0.005	0.001	[0.353 ; 0.416]	[-0.006 ; -0.003]	0.054	0.74	-135.9	47
Logarithmic										
76	0.472	0.018	-0.130	0.009	[0.435 ; 0.508]	[-0.148 ; -0.111]	0.058	0.73	-202.4	73
84	0.447	0.024	-0.107	0.014	[0.399 ; 0.495]	[-0.134 ; -0.080]	0.087	0.50	-126.8	65
90	0.568	0.021	-0.171	0.012	[0.526 ; 0.609]	[-0.195 ; -0.148]	0.054	0.76	-203.0	70
94	0.602	0.029	-0.187	0.016	[0.543 ; 0.660]	[-0.218 ; -0.155]	0.052	0.76	-139.4	47

n: number of measurement values used for modelling; *a* and *b*: coefficients of the models; SE: standard error of the coefficients; CI, 95%: confidence interval of the coefficients at the level of 95%; RMSE: root mean square error; R<sup>2</sup>: coefficient of determination of the model

In general, as the DC increases, the model that describes the  $\theta$ - $\rho$  relationship changes, showing that as compaction changes the soil structure, it can affect  $\rho$  values for the same  $\theta$ , as observed for temperate climate soils (Islam et al., 2012; Jeřábek et al., 2017; Kowalczyk et al., 2014; Romero-Ruiz et al., 2018; Roodposhti et al., 2019; Samouëlian et al., 2005; Seladji et al., 2010). The values of R<sup>2</sup> and RMSE show that the power model best described the  $\theta$ - $\rho$  relationship for the DC of 76% and 84%. For the DC of 90% and 94%, the logarithmic model had the best fit. The exponential model had the worst fit for all the DC evaluated.

For the purpose of providing greater validity to the choice of the best model, the Akaike Information Criterion (AIC) was also used, as previously described. The data presented in Table 4 show that for the DC of 76%, the power model was best. However, for the DC of 84%, as the difference between the power and logarithmic models was less than 2, both models well describe the  $\theta$ - $\rho$  relationship. In relation to the DC of 90% and 94%, the logarithmic model was best, which corroborates the analysis already made based on the  $R^2$  and RMSE values.

Therefore, the logarithmic model was considered the most suitable to express the effect of compaction on prediction of  $\theta$  from  $\rho$  data, as shown in Figure 5. The  $\theta$ - $\rho$  relationship in this Oxisol was affected by the DC and has two patterns, depending on whether the soil is moist (pattern A) or nearly dry (pattern B), with the threshold close to  $\theta$  value of  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . In pattern A, upon increasing the DC for the same value of  $\rho$ ,  $\theta$  increased. Thus, the use of  $\rho$  to estimate  $\theta$  in compacted soils may lead to an overestimation of  $\theta$  in the field, which may have consequences for soil management for crops – for example, less water than necessary might be applied in irrigation. Furthermore, it is noteworthy that this pattern is different from that observed for temperate climate soils (Roodposhti et al., 2019; Seladji et al., 2010), showing once more the importance of studies on the  $\theta$ - $\rho$  relationship in tropical soils.

In contrast, in pattern B, when the soil has  $\theta$  less than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , the opposite occurs, i.e., greater compaction for the same value of  $\rho$  leads to lower  $\theta$  values. These results corroborate data in the literature for temperate climate soils, as reported by Roodposhti et al. (2019). These authors evaluated the relationship between gravimetric water content and  $\rho$  in samples with different degrees of compaction – they found that the greater the compaction, the lower the gravimetric water content of the soil for the same value of  $\rho$ . Seladji et al. (2010) also observed greater gravimetric water content for samples that had lower Bd. However, under field conditions, pattern A is more likely to occur since it is highly unlikely that  $\theta$  reaches values below  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  in more weathered clayey soils, as observed by Serafim et al. (2013) when

they monitored water content in a clayey Oxisols of the Cerrado and found that the lowest value of  $\theta$  was approximately  $0.23 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  at the height of the dry period in the region.

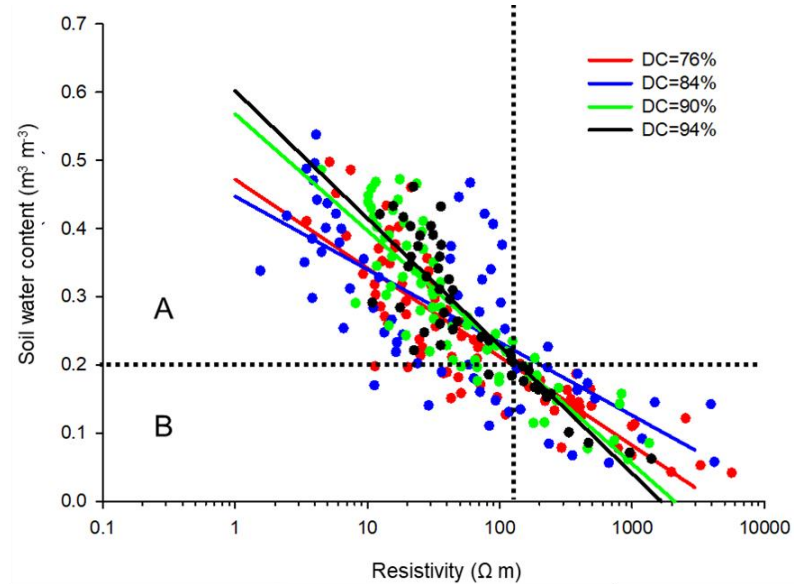


Figure 5. Relationship between soil water content and soil electrical resistivity by means of logarithmic models (lines) and observed values (points) in accordance with the degree of compaction (DC) in a Typic Hapludox of clay texture. The horizontal line drawn near  $\theta = 0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  represents the point at which there is a reversal in the  $\theta$ - $\rho$  relationship, which is influenced by the GC, thus delimiting regions A and B.

Another inference that can be made from Figure 5 concerns the effect of compaction on  $\rho$  for the same value of  $\theta$ . In pattern A, under the same  $\theta$  condition, increases in the DC lead to higher  $\rho$  values, which may be explained by the reduction in TPV (Table 2), resulting in larger pores still water-filled, but less connected compared to the soil with low DC. Farther, as the  $\theta$ - $\rho$  relationship is negative, i.e., the less water in the soil, the greater electrical resistivity will be, compacted soils will tend to have higher resistivity values (Naderi-Boldaji et al., 2014), especially under wetter conditions, in which pore space is predominantly filled by water. If the soil is well saturated, the  $\rho$  of the soil is closely related to the resistivity of free water. However,

when the soil is not entirely saturated, the liquid phase is then largely connected by bound water. Therefore, average resistivity is related to the thickness of the bound water films (Roodposhti et al., 2019).

In contrast, when the soil is drier (pattern B), compaction decreases  $\rho$  for the same value of  $\theta$ . When the soil is unsaturated, compaction reduces the porous space occupied by air, thus decreasing  $\rho$ . This result corroborates that reported in the literature for temperate climate soils (Basso et al., 2010; Besson et al., 2013; Hadzick et al., 2011; Jeřábek et al., 2017; Kowalczyk et al., 2014; Seladji et al., 2010). This result is also corroborated in the field experiment conducted by García-Tomillo et al. (2018) in which the  $\rho$  evaluated in an area below the wheel tracks of agricultural machinery decreased by around 35% in the first 0.05 m of the soil, and 22% and 21% at the depths of 0.05-0.10 m and 0.10-0.20 m, respectively. The literature suggests that the mechanism for the decrease in  $\rho$  caused by compaction is related to reduction in pore space and increasing contact among soil particles, that leads to greater passage of electrical current (Auerswald et al., 2001; Naderi-Boldaji et al., 2014). It is known that the clay fraction has high electrical conductivity, due to its high density of surface electrical charges that affect the electrical transmission mechanism in the soil (Calamita et al., 2012).

For diagnosis of soil compaction in the field using  $\rho$ , interpretation of the data obtained should be associated with current soil water content. Thus, if  $\theta$  is higher than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , higher  $\rho$  values indicate compaction; but if  $\theta$  is lower than that value, compacted locations will have lower  $\rho$  values. Since under drier conditions, the effect of water content is less, variations in  $\rho$  values indicate the effect of soil structure (compaction). For that reason, diagnosis of compaction by electrical resistivity should be performed under drier soil conditions.

Correlation analysis among the parameters of the logarithmic model, TPV, DC, Bd, and  $\rho$  was performed to better clarify the mechanisms that control the  $\rho$ -DC relationship (Table 5). To do so, the mean  $\rho$  values obtained when  $\theta$  was less than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $\rho_{\text{not wet}}$ ) and mean  $\rho$

values obtained when  $\theta$  was greater than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $\rho_{\text{wet}}$ ) were used. Although many studies report a negative relationship between Bd and  $\rho$ , in this study, the correlation between  $\rho_{\text{not wet}}$  and Bd was not directly significant. However, a significant and negative correlation was found for Bd and the  $b$  parameter of the logarithmic model, as well as for DC and  $b$ , i.e., the greater the soil compaction, the lower the  $b$  value. In addition, a positive correlation was found between  $b$  and  $\rho_{\text{not wet}}$ . Therefore, an inference can be made in an indirect manner: when the soil is under  $\theta$  conditions less than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , the greater the DC or the Bd, the lower  $\rho$  will be, supporting what was discussed above and the data from literature found for temperate climate soils.

Table 5. Pearson correlation coefficients ( $r$ ) among the parameters of the logarithmic model ( $a$  and  $b$ ) for the relationship between soil moisture ( $\theta$ ) and soil electrical resistivity ( $\rho$ ), total pore volume (TPV), degree of compaction (DC), soil bulk density (Bd), mean  $\rho$  values obtained when  $\theta$  was less than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $\rho_{\text{not wet}}$ ) and mean  $\rho$  values obtained when  $\theta$  was greater than  $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $\rho_{\text{wet}}$ ). The significant ( $p < 0.05$ ) Pearson correlation coefficients are shown in bold print.

	$a$	$b$	TPV	DC	Bd	$\rho_{\text{not wet}}$	$\rho_{\text{wet}}$
$a$	1.000	-0.834	-0.179	0.563	0.566	-0.176	-0.672
$b$		1.000	-0.084	-0.679	-0.681	0.341	-0.181
TPV			1.000	-0.362	-0.359	-0.293	-0.368
DC				1.000	0.999	-0.433	0.058
Bd					1.000	-0.439	0.055
$\rho_{\text{not wet}}$						1.000	0.809

The  $\rho_{\text{wet}}$  variable is correlated only with  $\rho_{\text{not wet}}$  and does not show any relation to the other variables (Bd, DC, TPV,  $a$  and  $b$ ), which reinforces that idea that the B region (drier) of

Figure 5 is the most appropriate for diagnosing compaction. In this respect, Hadzick et al. (2011) evaluated how soil bulk density, pH, and organic matter content affect the  $\rho$  estimate, and found a negative correlation between Bd and  $\rho$ . Nevertheless, as emphasized by Jeřábek et al. (2017), the magnitude of the correlation between Bd and  $\rho$  exhibits wide variation among the studies in the literature, emphasizing the importance of more studies in this regard, above all in soils under a tropical climate, considering the relations between  $\rho$  and soil porosity.

### **3.3 Prediction of $\rho$ in accordance with DC and DS, and prediction of DS in accordance with DC and $\rho$**

The degree of saturation (DS) represents how much of the total pore volume (TPV) of the soil is filled with water. Soil compaction, measured by the degree of compaction (DC), directly affects the TPV, therefore changes in the relationship between DC, DS and  $\rho$  are expected as DC increases.

The parameters of the additive model proposed for prediction of  $\rho$  in accordance with DC and DS ( $\log \rho = \alpha + \beta_{DC}DC + \beta_{DS}DS$ ) were  $\alpha = 2.079$ ,  $\beta_{DC} = 0.011$ , and  $\beta_{DS} = -0.022$ . This model had a good fit, with  $R^2 = 0.61$  and  $RMSE = 0.429 \Omega m$ , and significant ( $p < 0.01$ ) estimated parameters (Figure 6A). It was observed that  $\theta$  has a greater effect on  $\rho$  than DC does, since the parameter of the DS variable was significant at 0.001% and that of the DC variable was significant at 1%. In addition, the DS retained 72% of the total variability of the data, whereas the DC retained only 0.26%. Furthermore, the absolute value of the  $\beta_{DS}$  parameter (0.022) is double the value of the  $\beta_{DC}$  (0.011).

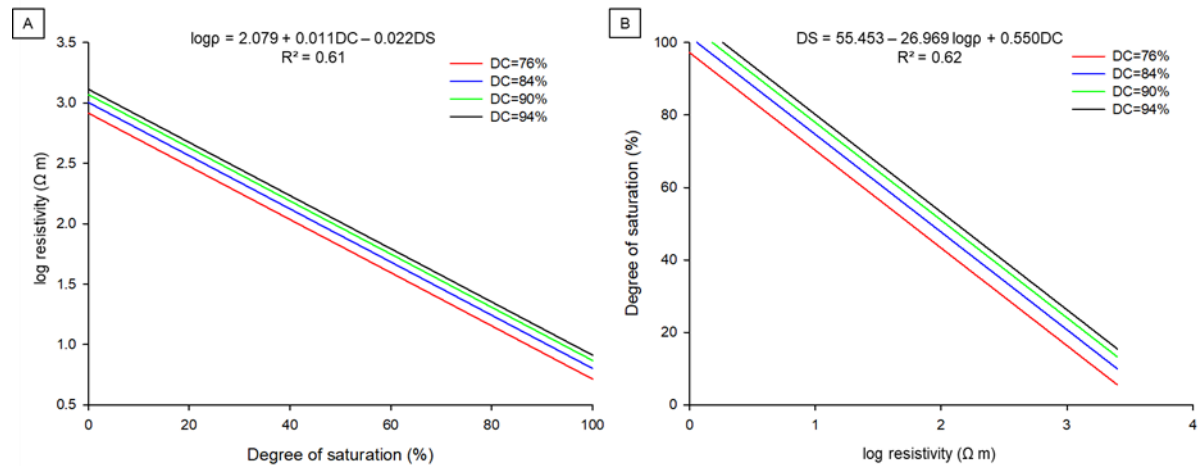


Figure 6. (A) Models for soil electrical resistivity in relation to the degree of saturation (DS) and degree of compaction (DC); (B) models for the DS in accordance with soil electrical resistivity and the DC.

According to Besson et al. (2013), the relationship between  $\rho$  and  $Bd$  may be insignificant when additional variables dependent on time, such as soil water content, interact with soil electrical resistivity. In this respect, Filho et al. (2015) investigated the relationship among  $\rho$ ,  $\theta$ , and compaction in soils of different textures; they also observed that compaction affected the  $\rho$  values at lower magnitude compared to  $\theta$ , especially for soils with a greater clay content. In an analogous way to Figure 6A, Roodposhti et al. (2019) simultaneously studied the  $\rho$ - $\theta$ -DC relationship, and observed the predominant effect of gravimetric water content on  $\rho$ . Therefore, compaction should be diagnosed when the soil is drier because without the effect of soil water content, variations in the values of resistivity indicate changes in soil structure, above all when other factors are controlled for.

Compaction has an effect on soil water storage since it changes porosity, and thus a model was proposed for prediction of DS in accordance with  $\rho$  and DC (Figure 6B). The model ( $DS = \alpha + \beta_{\rho} \log \rho + \beta_{DC} DC$ ) had a good fit, with an  $R^2$  of 0.62 and RMSE = 14.9%, and all estimated parameters were significant ( $p < 0.001$ ), specifically  $\alpha = 55.45$ ,  $\beta_{\rho} = 26.97$ , and  $\beta_{DC} =$



0.55. For the same value of  $\rho$ , compaction results in higher DS, which can also be explained by the reduction in TPV because, for the same condition of  $\theta$ , the compacted sample has most of its porous space occupied by water in comparison to the sample that is less compacted, since the DS is a relation between  $\theta$  and the TPV. It should be emphasized that the DS- $\rho$  relationship of this Figure reflects the  $\theta$ - $\rho$  relationship predominant in Figure 5, which is pattern A. The simultaneous effect of  $\rho$  and of DC on  $\theta$  is now visualized in Figure 6B. In this respect, use of the technique of  $\rho$  measurement to estimate  $\theta$  proves to be relevant, even though it is affected by the soil structure condition. Together with the operational advantages of the technique (Romero-Ruiz et al., 2018; Samouëlian et al., 2005), the preponderant effect of  $\theta$  in relation to that of the DC observed in the present study can be added, which favorably inclines toward application of this technique to weathered tropical soils.

#### **4 Conclusions**

The technique of electrical resistivity proved to be a tool of good accuracy for estimating soil water content in soils under a weathered tropical climate (Typic Hapludox). In spite of the distinct pattern compared to soils of temperate climate, showing a lower  $\rho$  value for the same  $\theta$  value, the power model (analytic form of “Archie’s Law”) was the most effective in describing the  $\theta$ - $\rho$  relationship in this soil.

The  $\theta$ - $\rho$  relationships were affected by the degree of soil compaction. However, the logarithmic model best allowed differentiation of the effects of soil compaction on the  $\theta$ - $\rho$  relationship. Modeling  $\rho$  with regard to the degree of compaction and with the degree of saturation with water led to the conclusion that in the soil evaluated, the effect of soil water content has a greater effect on electrical resistivity than soil compaction does. This therefore suggests that the technique of measurement of  $\rho$  for diagnosis of soil compaction should be performed under drier soil conditions, to eliminate the preponderant effect of soil water content.

However, this technique should be validated in the field, considering the spatial variability of soil water content and of its attributes (total pore volume, pore-size distribution, texture, etc.).

### **Acknowledgments**

Authors thank DCS-UFLA for support and infrastructure and National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Coordination of Superior Level Staff Improvement (CAPES) and Minas Gerais Research Support Foundation (FAPEMIG) for project funding.

This work was supported by the National Council for Scientific and Technological Development [grant numbers 408204/2016-8, 312799/2018-7]; the Minas Gerais Research Support Foundation [grant number APQ-02075-16].

### **Bibliographical references**

- Abu-Hassanein, Z.S., Benson, C.H., Blotz, L.R., 1996. Electrical resistivity of compacted clays. *J. Geotech. Eng.* 122, 397–406.
- Adhikari, K., Hartemink, A.E., 2016. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma* 262, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Ajayi, A.E., Junior, M.S.D., Curi, N., Oladipo, I., 2013. Compressive response of some agricultural soils influenced by the mineralogy and moisture. *Inst. Agrophysics* 27, 239–246. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0091-x>
- Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 19, 716–723.
- Al Hagrey, S.A., Meissner, R., Werban, U., Rabbel, W., Ismaeil, A., 2004. Hydro-, bio-geophysics. *Lead. edge* 23, 670–674.
- Alamry, A.S., van der Meijde, M., Noomen, M., Addink, E.A., van Benthem, R., de Jong, S.M., 2017. Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical resistivity

- tomography in Mediterranean soils. *Catena* 157, 388–396.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.001>
- Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Gonçalves, J.L.D.M., Sparovek, G., 2014. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22, 711–728.  
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Archie, G.E., 1942. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. *Trans. AIME* 146, 54–62.
- Auerswald, K., Simon, S., Stanjek, H., 2001. Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. *Soil Sci.* 166, 382–390.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-200106000-00003>
- Basso, B., Amato, M., Bitella, G., Rossi, R., Kravchenko, A., Sartori, L., Carvahlo, L.M., Gomes, J., 2010. Two-Dimensional spatial and temporal variation of soil physical properties in tillage systems using electrical resistivity tomography. *Agron. J.* 102, 440–449. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0298>
- Baty, F., Ritz, C., Charles, S., Brutsche, M., Flandrois, J.-P., Delignette-Muller, M.-L., 2015. A Toolbox for Nonlinear Regression in R : The Package nlstools. *J. Stat. Softw.* 66, 1–21.
- Besson, A., Cousin, I., Bourennane, H., Nicoullaud, B., Pasquier, C., Richard, G., Dorigny, A., King, D., 2010. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 120–132.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01211.x>
- Besson, A., Séger, M., Giot, G., Cousin, I., 2013. Identifying the characteristic scales of soil structural recovery after compaction from three in- field methods of monitoring. *Geoderma* 204–205, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.010>
- Blake, G.R., Hartge, K.H., 1986. Bulk Density, in: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison,

pp. 363–375.

- Boone, F.R., 1988. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. *Soil Tillage Res.* 11, 283–324.
- Brillante, L., Mathieu, O., Bois, B., Leeuwen, C. Van, Lévêque, J., 2015. The use of soil electrical resistivity to monitor plant and soil water relationships in vineyards. *Soil* 1, 273–286. <https://doi.org/10.5194/soil-1-273-2015>
- Brunet, P., Clément, R., Bouvier, C., 2010. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) - A case study in the Cevennes area, France. *J. Hydrol.* 380, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.10.032>
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach, 2nd ed. Springer, Colorado. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511802461.005>
- Calamita, G., Brocca, L., Perrone, A., Piscitelli, S., Lapenna, V., Melone, F., Moramarco, T., 2012. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *J. Hydrol.* 454–455, 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.001>
- Carducci, C.E., Oliveira, G.C. de, Severiano, E. da C., Zeviani, W.M., 2011. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 77–86.
- Celano, G., Palese, A.M., Ciucci, A., Martorella, E., Vignozzi, N., Xiloyannis, C., 2011. Evaluation of soil water content in tilled and cover-cropped olive orchards by the geoelectrical technique. *Geoderma* 163, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.03.012>
- Cosenza, P., Marmet, E., Rejiba, F., Cui, Y.J., Tabbagh, A., Charlery, Y., 2006. Correlations between geotechnical and electrical data : A case study at Garchy in France. *J. Appl. Geophys.* 60, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2006.02.003>

- Curi, N., Silva, S.H.G., Poggere, G.C., Menezes, M.D. de, 2017. Mapeamento de Solos e Magnetismo no campus da UFLA como traçadores ambientais. Lavras.
- DaMatta, F.M., Ramalho, J.D.C., 2006. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production : a review. *Brazilian J. Plant Physiol.* 18, 55–81.
- Dick, J., Tetzlaff, D., Bradford, J., Soulsby, C., 2018. Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. *J. Hydrol.* 559, 684–697. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.062>
- Dingman, S.L., 2002. *Physical hydrology*, 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Dingman, S.L., 1994. *Physical Hydrology*, 1st ed. Prentice Hall, New Jersey.
- Ferreira, J.N., Bustamante, M., Garcia-Montiel, D.C., Caylor, K.K., Davidson, E.A., 2007. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna. *Oecologia* 153, 417–430. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0747-6>
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999a. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 23, 515–524.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999b. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 23, 507–514.
- Filho, A.M.S., Furriel, G.P., Calixto, W.P., Alves, A.J., Profeta, F.A., Domingos, L., Domingues, E.G., Narciso, M.G., 2015. Methodology to Correlate the Humidity , Compaction and Soil Apparent Electrical Conductivity, in: *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. IEEE, pp. 729–734
- Garcia-Montiel, D.C., Coe, M.T., Cruz, M.P., Ferreira, J.N., Da Silva, E.M., Davidson, E.A., 2008. Estimating seasonal changes in volumetric soil water content at landscape scales in

- a Savanna ecosystem using two-dimensional resistivity profiling. *Earth Interact.* 12, 1–25.  
<https://doi.org/10.1175/2007EI238.1>
- García-Tomillo, A., Figueiredo, T. De, Dafonte, J.D., Almeida, A., Paz-González, A., 2018. Effects of machinery trafficking in an agricultural soil assessed by Electrical Resistivity Tomography (ERT). *Open Agric.* 3, 378–385.
- Hadzick, Z.Z., Guber, A.K., Pachepsky, Y.A., Hill, R.L., 2011. Pedotransfer functions in soil electrical resistivity estimation. *Geoderma* 164, 195–202.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.004>
- Hillel, D. 2003. *Introduction to Environmental Soil Physics*. New York, Academic Press. 494p.
- IBGE, 2019. *Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil: Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro.
- Islam, T., Chik, Z., Mustafa, M.M., Sanusi, H., 2012. Modeling of electrical resistivity and maximum dry density in soil compaction measurement. *Environ. Earth Sci.* 67, 1299–1305. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1573-7>
- Jayawickreme, D.H., Dam, R.L. Van, Hyndman, D.W., 2010. Hydrological consequences of land-cover change : Quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. *Geophysics* 75, 43–50.
- Jeřábek, J., Zúmr, D., Dostál, T., 2017. 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>
- Kämpf, N., Marques, J.J., Curi, N., 2012. Mineralogia de solos brasileiros, in: Ker, J.C., Curi, N., Schaefer, C.E.G.R., Vidal-Torrado, P. (Eds.), *Pedologia - Fundamentos*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 343.
- Kowalczyk, S., Maślakowski, M., Tucholka, P., 2014. 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>
- Letey, J., 1985. Relationship between soil physical properties and crop productions, in: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. Springer-Verlag, Texas, pp. 277–294.
- Ma, Y., Van Dam, R.L., Jayawickreme, D.H., 2014. Soil moisture variability in a temperate deciduous forest : insights from electrical resistivity and throughfall data. *Environ. Earth Sci.* 72, 1367–1381. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3362-y>
- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., Tabbagh, A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resour. Res.* 39, 1–20. <https://doi.org/10.1029/2002WR001581>
- 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, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.006>
- Peixoto, D.S., Silva, B.M., Oliveira, G.C. de, Moreira, S.G., da Silva, F., Curi, N., 2019. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil Tillage Res.* 194, 104307. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104307>
- R Core, T., 2018. *R: A language and environment for statistical computing*.
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Resende, M., Curi, N., Rezende, S.B. de, Corrêa, G.F., Ker, J.C., 2014. *Pedologia base para distinção de ambientes*, 6th ed. Editora UFLA, Lavras.

- Rios, G.F.A., Carvalho, L.G. de, Silva, B.M., Silva, W.G. da, Rezende, F.C., Pereira, G.M., 2013. Component production of castor bean crop irrigated by different soil water tensions. *Agric. Water Manag.* 127, 7–12. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.05.007>
- Robinson, D.A., Campbell, C.S., Hopmans, J.W., Hornbuckle, B.K., Jones, S.B., Knight, R., Ogden, F., Selker, J., Wendroth, O., 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zo. J.* 7, 358–389. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>
- Romero-Ruiz, A., Linde, N., Keller, T., Or, D., 2018. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. *Rev. Geophys.* 56, 672–697. <https://doi.org/10.1029/2018RG000611>
- 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>
- Sakai, E., Augusto, E., Barbosa, A., Maria, J., Silveira, D.C., Célia, R., Pires, D.M., 2015. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. *Agric. Water Manag.* 148, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.020>
- Samouëlian, 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>
- Seladji, S., Cosenza, P., Tabbagh, A., Ranger, J., Richard, G., 2010. The effect of compaction on soil electrical resistivity : a laboratory investigation. *Eur. J. Soil Sci.* 61, 1043–1055. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01309.x>
- Serafim, M.E., Oliveira, G.C., Lima, J.M., Silva, B.M., Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., 2013. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Rev. Bras. Eng.*



- Agric. e Ambient. 17, 362–370. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A. Da, Guimarães, P.T.G., Melo, L.B.B. de, Norton, L.D., Curi, N., 2019. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. *Soil Tillage Res.* 189, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.016>
- Silva, B.M., Silva, É.A. da, Oliveira, G.C. de, Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, L.C., 2019. Monitoramento do vigor de cafeeiros submetidos a estratégias de manejo para atenuar os efeitos da escassez hídrica. 82 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Soil Survey Staff, 2014. *Keys to soil taxonomy*, 12th ed. United States Department of Agriculture, Washington.
- Wei, T., Simko, V., 2017. R package “corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84).
- Zhu, J.J., Kang, H.Z., Gonda, Y., 2007. Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land. *Pedosphere* 17, 801–812. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60096-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60096-4)

## ARTIGO II

### **O uso eficiente da água do solo pelo *Citrus* depende do seu porta-enxerto e preparo profundo dos sulcos em solo adensado?**

(Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003))

**Resumo:** O preparo profundo do solo pode ser uma alternativa para contornar os problemas impostos pela presença de uma camada adensada em Argissolo. Além disso, o sistema radicular das plantas pode implicar em alterações nos serviços ambientais, devido a modificações na estrutura do solo. Assim, os objetivos desse estudo foram avaliar a dinâmica da umidade do solo ( $\theta$ ) no perfil do solo ao longo do ano por meio da resistividade elétrica ( $\rho$ ) e, após obtida equação de calibração para o Argissolo, inferir sobre o desenvolvimento radicular e absorção de água pelos porta-enxertos e verificar a influência do uso de diferentes porta-enxertos na dinâmica de água do solo. A avaliação da dinâmica espaço-temporal da variável  $\theta$  foi realizada por meio da resistividade elétrica do solo em três épocas do solo (setembro/2018, fevereiro/2019 e agosto/2019). O experimento foi conduzido em lavoura de citros instalada sobre Argissolo no município de Perdões, Minas Gerais. O preparo do solo constituiu-se de abertura dos sulcos e subsolagem a 0,60 m de profundidade e os tratamentos constituíram de três porta-enxertos (Cravo Santa Cruz – CSC; Tangerineira “Sunki Tropical” – ST; e Citrandarin Índio – CI). Além disso, avaliações também foram realizadas em área de mata nativa, considerada como referência em relação ao manejo adotado. A entrelinha de cultivo foi coberta com braquiária. Em laboratório, avaliou-se a variação da  $\rho$  em função da perda de água nas amostras, obtendo dessa forma a equação que descreve a relação entre  $\theta$  e  $\rho$  para a situação avaliada. Estabelecida essa relação foi possível gerar imagens que retratam a  $\theta$  de forma bidimensional no solo. Ainda foi possível calcular a variação da  $\rho$  e  $\theta$  a partir das imagens geradas. Dessa forma, a  $\rho$  mostrou-se como potencial ferramenta para avaliação da dinâmica da  $\theta$  no perfil do solo ao longo do tempo, apresentando boa acurácia para a estimativa da  $\theta$  em solo desenvolvido sob clima tropical. Dentre os porta-enxertos avaliados, o CSC foi o que absorveu mais água, devido ao maior desenvolvimento do sistema radicular. O preparo profundo do Argissolo favoreceu a redistribuição de água no perfil do solo, evidenciado pela menor  $\theta$  nas camadas mais profundas nos tratamentos que não foram submetidos às operações de preparo.

**Palavras-chave:** Umidade do solo. Resistividade elétrica do solo. Manejo conservacionista. Dinâmica de água no solo. Sensoriamento proximal.

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o segundo maior produtor de frutas cítricas do mundo (FAO, 2018), com produção aproximada de 20 milhões de toneladas de frutos em 2017 (IBGE, 2018). A tangerina é o segundo gênero mais plantado no país, sendo cultivado em mais de 50 mil hectares (IBGE, 2018). O estado de Minas Gerais é responsável por cerca de 20% da produção nacional da fruta, com aproximadamente 204 mil toneladas produzidas em 2018, de acordo com dados da Secretaria Estadual de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA, 2019).

A utilização de porta-enxertos (PE) nos pomares citrícolas brasileiros é prática difundida entre os produtores, por proporcionar melhorias associadas ao desenvolvimento e produtividade das lavouras. No entanto, estudos sobre sistemas radiculares de PE de citros mostraram grandes diferenças entre espécies em forma, quantidade e profundidade de crescimento raízes (CINTRA; LIBARDI; JORGE, 1999; NEVES et al., 2004; OLIVEIRA; VIEIRA; SOUZA, 1998; ZACCHEO et al., 2012), o que pode implicar na melhoria da qualidade do solo devido a modificações na estrutura (ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; PRANDO et al., 2010).

Dentre os diferente porta-enxertos utilizados, destaca-se o uso do limoeiro 'Cravo Santa Cruz', que é uma seleção de limoeiro 'Cravo' e por isso apresenta grande rusticidade e adaptação a diferentes condições de clima e solo (SOARES FILHO; CUNHA SOBRINHO; PASSOS, 2003). O porta-enxerto tangerineira 'Sunki' (*Citrus sunki* (Hayata) Hort. ex Tanaka), originária da China, está entre os principais porta-enxertos cítricos comerciais. Confere à copa elevado vigor, boa produtividade de frutos, além de ser tolerante a doenças, como tristeza, à seca, o que proporciona maturação tardia dos frutos. O 'Citrandarin Índio' é um híbrido proveniente do cruzamento entre a tangerina 'Sunki, *Citrus sunki* (Hayata) hort. ex Tanaka versus *Poncirus trifoliata* (L.), vem sendo considerado muito promissor principalmente por promover maior eficiência produtiva (CARVALHO et al., 2016) e reduzir o porte das plantas (BASTOS et al., 2014).

Grande parte dos pomares citrícolas brasileiros estão instalados em áreas de Argissolo (MATTOS JUNIOR et al., 2005), que representam cerca de 28% do território brasileiro (IBGE, 2019). A principal característica desses solos é o acúmulo de argila no horizonte B, que pode levar à formação de uma camada adensada (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006). Quando próxima à superfície do solo esse adensamento pode proporcionar alterações no potencial de água, temperatura, aumento na resistência à penetração das raízes e redução da aeração do solo, com reflexos no movimento de água e dificuldade no crescimento das raízes dos citros

(CINTRA; LIBARDI, 1998; SOUZA et al., 2008), impedindo ou diminuindo a percolação de água no perfil do solo e facilitando os processos erosivos.

Uma alternativa para contornar esses problemas e viabilizar ou tornar a produção agrícolas nesses solos mais sustentáveis é o preparo mais profundo do solo, rompendo a camada adensada (MEDEIROS et al., 2013; SCHNEIDER et al., 2017; SOUZA et al., 2004). Essa prática facilita o desenvolvimento dos sistemas radiculares das plantas, aumenta as taxas de entrada de água no solo e sua redistribuição no perfil (PIKUL; AASE, 2003; SCHNEIDER et al., 2017), o que aliado a outras práticas de manejo, por exemplo manter a entrelinha vegetada (FIDALSKI; TORMENA, 2007; FIDALSKI; TORMENA; SILVA, 2007; SILVA et al., 2016), tornam esses ambientais mais sustentáveis do ponto de vista ambiental e mais produtivos sob a perspectiva agrícola.

O monitoramento e modelagem dos sistemas solo-planta são uma questão-chave ainda não resolvida, e que limitam o desenvolvimento de uma visão abrangente das interações entre solo e atmosfera (CASSIANI et al., 2016). Nesse sentido, estudos têm utilizado a resistividade elétrica ( $\rho$ ) para mensurar a variação da umidade ( $\theta$ ) no perfil do solo ao longo do tempo (CARRIÈRE et al., 2020; CONSOLI et al., 2017; DICK et al., 2018; JAYAWICKREME; VAN DAM; HYNDMAN, 2008; MA; VAN DAM; JAYAWICKREME, 2014; SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009; VANELLA et al., 2018), permitindo inferir sobre a absorção de água pela planta e também sobre a recarga de lençol. O uso dessa ferramenta possibilita o monitoramento em escala temporal das variações de  $\theta$ , pois dentre as variáveis que influenciam a  $\rho$ , essa é a única que varia significativamente em curto espaço de tempo (ALAMRY et al., 2017). Além disso, é possível obter informações nas diferentes profundidades do solo (ROBINSON et al., 2008; ZHU; KANG; GONDA, 2007), que possibilitam o estudo de variações espaciais tanto no sentido horizontal quanto vertical do solo.

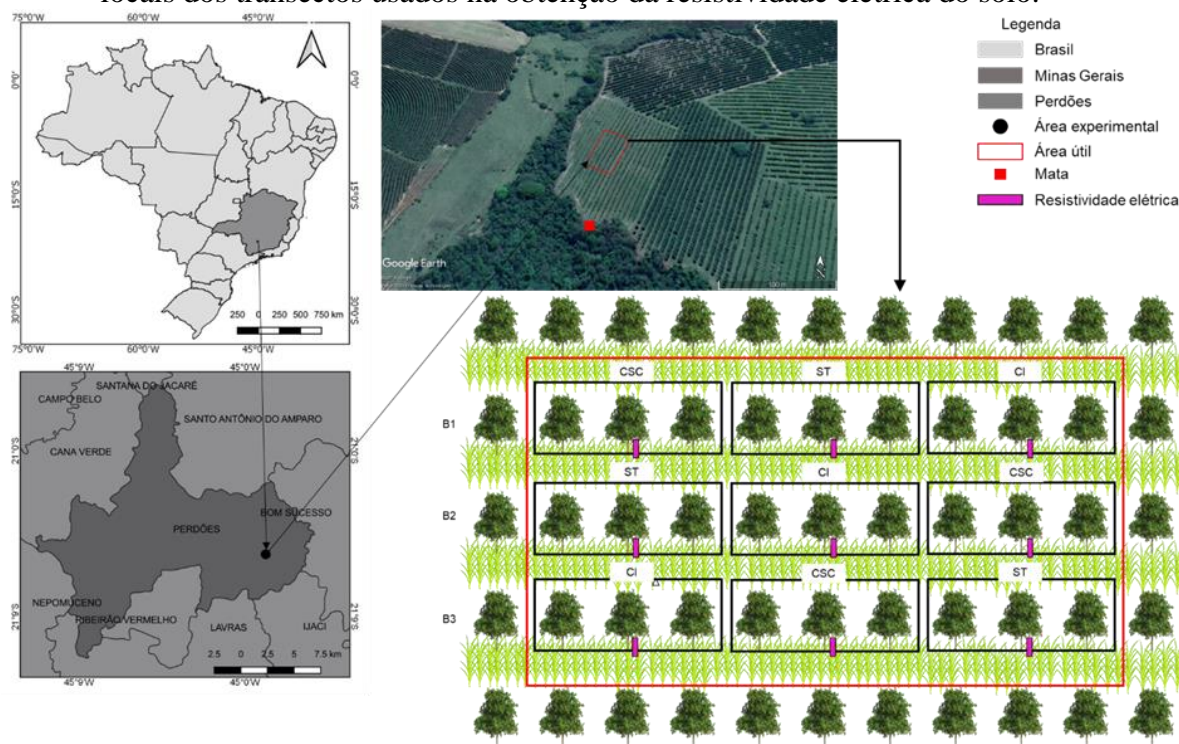
Assim, as hipóteses desse trabalho são: (i) o manejo profundo adotado para o cultivo de citros em Argissolo abranda as limitações decorrentes da camada adensada e contribui para aumentar o armazenamento de água no solo, e (ii) o crescimento radicular depende do porta-enxerto, que poderá promover distintos padrões de alteração da porosidade do solo, com consequências no armazenamento de água. Portanto, objetivou-se com o estudo: (i) avaliar a dinâmica espaço-temporal da umidade do solo ao longo do ano por meio da resistividade elétrica com base na equação de calibração para o Argissolo, (ii) avaliar o desenvolvimento radicular e absorção de água pelos porta-enxertos, (iii) verificar a influência do uso de diferentes porta-enxertos na dinâmica de água do solo; e (iv) avaliar o efeito do preparo profundo no armazenamento e redistribuição de água do solo..

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área experimental

A área experimental está localizada em uma fazenda produtora de citros no município de Perdões, microrregião do Campo das Vertentes em Minas Gerais (FIGURA 1), com coordenadas geográficas 21°05'36"S e 44°58'52"O (Datum WGS84) e altitude de 890 m. O experimento foi instalado no terço inferior de encosta com declividade máxima de 13%, e face de exposição para sudoeste, em área de 550 m<sup>2</sup> (22 por 25 m). Segundo classificação de Köppen, o clima da região é Cwb com invernos frios e secos e verões quentes e chuvosos, com temperatura média de 19° C e pluviosidade anual de 1669 mm (ALVARES et al., 2014).

Figura 1 - Localização da área experimental, croqui do delineamento experimental adotado e locais dos transectos usados na obtenção da resistividade elétrica do solo.



Fonte: Do autor (2020)

O solo sobre o qual o experimento está instalado foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa (SANTOS et al., 2018), correspondente a Typic Hapludult (SOIL SURVEY STAFF, 2014). A textura do solo no horizonte A é composta por 37% de argila, 16% de silte e 47% de areia, e horizonte Bt por 38% de argila, 13% de silte e 49% de areia. Apesar da ausência de gradiente textural, a classificação do solo se deu por outras características identificadas durante a caracterização morfológica do perfil do solo, como

cerosidade e estrutura nos horizontes A e B. Análises de fertilidade do solo foram realizadas em abril/2018 no sulco de plantio para cada tratamento e na área de vegetação nativa próxima, fragmento de mata atlântica com Floresta Sazonal Semidecidual, na mesma classe de solo da área experimental. A caracterização química do solo das áreas avaliadas encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química do solo por tratamento e na área de mata

Trat.	Camada	pH	K <sup>+</sup>	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	T	V	M.O.
	m	H <sub>2</sub> O	-- mg dm <sup>-3</sup> --		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				%	dag kg <sup>-1</sup>
Mata	0-0,05	6,10	151,68	2,78	4,43	1,72	0,06	10,12	64,61	3,64
	0,35-0,40	5,00	74,27	1,06	0,78	0,26	0,74	6,45	19,08	1,81
CSC	0-0,05	6,30	241,86	167,77	5,95	1,39	0,03	9,73	81,56	2,60
	0,35-0,40	5,37	42,68	2,54	2,28	0,64	0,11	5,51	54,54	1,07
ST	0-0,05	7,17	232,33	21,40	4,99	1,34	0,04	8,25	84,01	2,50
	0,35-0,40	5,67	50,52	3,76	2,27	0,68	0,14	5,43	56,11	1,29
CI	0-0,05	6,30	216,93	404,60	7,35	1,05	0,03	10,81	82,87	2,32
	0,35-0,40	6,27	62,45	9,13	2,91	0,58	0,07	5,44	64,32	1,01

CSC: Cravo Santa Cruz; ST: Sunki Tropical; CI: Cintrandarin Índio; pH em água: relação de 1:2,5 (solo: água); M.O. - Matéria Orgânica do Solo - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10N; P e K: Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>: Extrator: KCl - 1 mol L<sup>-1</sup>; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V%: Índice de Saturação de Bases

Fonte: Do autor (2020)

O histórico de uso da área foi como pastagem entre 2000 e 2005, lavoura de milho entre 2006 e 2007 e, no período de 2007 a 2013, foi utilizada para produção de maracujá. Para a instalação da cultura do citros foi realizada correção da acidez em área total antes da abertura dos sulcos com aplicação de 2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, sem incorporação ao solo. O preparo do solo, realizado em novembro de 2014 pelo produtor, consistiu na abertura do sulco com dimensões de 0,40 m de largura e 0,50 de profundidade utilizando um sulcador de uma haste. Após, foi incorporado no fundo do sulco aberto uma dosagem adicional de calcário dolomítico (200 g.m<sup>-1</sup>) e superfosfato simples (400 g.m<sup>-1</sup>) de forma manual. Após a correção, os sulcos foram subsolados duas vezes, no mesmo sentido da linha de plantio, até cerca de 0,50 m de profundidade com um subsolador de três hastas equidistantes 0,45 m. Em seguida, foi utilizada grade niveladora sobre o sulco para acertar o terreno e elevar o leito de plantio.

Em dezembro de 2014 foi realizado o plantio das mudas em covas de 0,30 m de diâmetro e 0,50 m de profundidade, as quais foram dispostas em um espaçamento de 2,5 m entre plantas e 5,5 m entre linhas. Em consórcio com o citros, realizou-se o plantio da gramínea *Brachiaria decumbens* (Syn. *Urochloa*), na entrelinha, que é roçada periodicamente e deslocada (amontoa) para a linha de plantio. As mudas de tangerina ‘Poncã’ (*Citrus reticulata*. Blanco) foram

provenientes de viveiro certificado, que se utilizou de sementes e borbulhas cedidas pela EMBRAPA Mandioca e Fruticultura Tropical – CNPMF.

Os tratamentos desse estudo constituem-se de três porta-enxertos, todos sob copa de tangerina 'Poncã' (*Citrus reticulata*. Blanco), sendo eles: Citrandarin Índio (*Citrus sunki* (Hayata) Hort. ex Tanaka) x Trifoliata (*Poncirus trifoliata* (L.)) – CI; tangerineira “Sunki Tropical” (*Citrus sunki* (Hayata) Hort. ex Tanaka) – ST; e Cravo Santa Cruz (*Citrus Limonia* Osbeck) - CSC. As parcelas experimentais de cada tratamento foram dispostas em três blocos e são constituídas por três plantas úteis. A condição de referência para avaliação dos efeitos do manejo adotado nesse estudo é uma área de vegetação nativa secundária com mata atlântica que se encontra próxima às parcelas experimentais. A Figura 1 também mostra o esquema do delineamento experimental adotado.

## 2.2 Parâmetros hidrológicos da área experimental

Foram determinadas a capacidade de infiltração de água (TABELA 2) e condutividade hidráulica saturada (TABELA 3). A estimativa da taxa de infiltração de água no solo foi realizada pelo método do Cornell Sprinkle Infiltrometer (CSI), ou infiltrômetro de Cornell, descrito por Van Es; Schindelbeck (2003), em campo, no sulco de plantio de cada tratamento, na entrelinha coberta por braquiária e na área de mata. O tempo do ensaio foi de 60 minutos ou até atingir quatro leituras iguais e consecutivas de escoamento. As leituras do volume aplicado e escoado foram tomadas a cada 3 minutos.

Os dados foram ajustados a equação Kostiakov (equação 1) para taxa de infiltração acumulada ao longo do tempo com auxílio do software R (R CORE, 2018). A velocidade básica de infiltração (VIB) foi encontrada a partir da primeira derivada da equação 1 e o tempo em que a VIB inicia-se foi calculado a partir da segunda derivada da equação 1 (MELLO; SILVA, 2013).

$$Ia = At^n \quad (1)$$

onde Ia é a taxa de infiltração acumulada ( $\text{cm min}^{-1}$ ); t é o tempo (min); A e n são constantes empíricas de ajuste do modelo.

Os valores encontrados para VIB, o tempo do início da VIB e o coeficiente de determinação do modelo ajustado para cada área caracterizada são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Velocidade básica de infiltração (VIB), tempo a partir do qual inicia-se a VIB, e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da equação de Kostiakov ajustada para áreas de mata, entrelinha coberta com braquiária, porta-enxerto “Cravo Santa Cruz” (CSC), porta-enxerto “Sunki Tropical” (ST), porta-enxerto “Citrandarin Índio” (CI).

Situação	VIB (cm min <sup>-1</sup> )	Início da VIB (min)	$R^2$
Mata	0,228	119	0,998
Entrelinha	0,006	23	0,888
CSC	0,217	131	0,998
ST	0,246	147	0,998
SI	0,258	156	0,998

Fonte: Do autor (2020)

A condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante descrito em Teixeira et al. (2017). As amostras foram coletadas nas camadas 0-0,10 m e 0,35-0,45 m e em três posições do sulco de plantio: E: 0,5 m à esquerda do tronco da planta; S: tronco da planta; e D: 0,5 m à direita do tronco. Essas posições foram escolhidas para amostragem, pois observou-se em análise de campo diferenças estruturais entre elas. Após preparadas, as amostras foram submetidas à saturação com água, lentamente, por capilaridade, durante 48 horas. O valor de  $K_s$  foi estimado pela equação de Darcy (equação 2).

$$K_s = \frac{(V * L)}{(A * H * t)} \quad (2)$$

em que  $K_s$ : condutividade hidráulica saturada (cm h<sup>-1</sup>); V: volume de água coletado (mL); L: altura do corpo de prova (cm); A: área do corpo de prova (cm<sup>2</sup>); H: altura do corpo de prova + altura da coluna de água (cm); t: tempo de percolação (h).

A  $K_s$  foi corrigida para temperatura de 20°C por meio da equação 3.

$$K_{20} = K_t * \left( \frac{\mu_T}{\mu_{20}} \right) \quad (3)$$

em que  $K_{20}$ : condutividade hidráulica saturada a 20°C;  $K_T$ : condutividade hidráulica saturada a T°C;  $\mu_{20}$ : viscosidade da água a 20°C;  $\mu_T$ : viscosidade da água a T°C.

Os valores calculados para condutividade hidráulica saturada, após correção da temperatura, para cada área caracterizada são apresentados na Tabela 3.



Tabela 3 – Valores de condutividade hidráulica saturada (Ks) para áreas de mata, entrelinha coberta com braquiária, porta-enxerto “Cravo Santa Cruz” (CSC), porta-enxerto “Sunki Tropical” (ST), porta-enxerto “Citrandarin Índio” (CI), e camadas 0-0,10 m e 0,35-0,45 m e posições de amostragem.

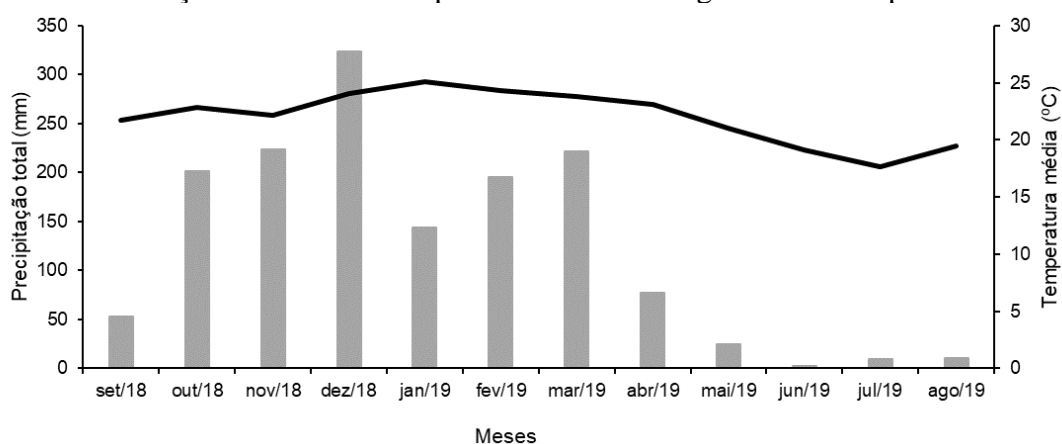
Situação	Camada (m)					
	0-0,10			0,35-0,45		
	Posição					
	E	S	D	E	S	D
Mata	-----	10,15	-----	-----	7,18	-----
Entrelinha	-----	2,67	-----	-----	2,53	-----
CSC	7,39	20,75	23,46	27,23	15,45	7,10
ST	7,37	12,45	13,21	3,96	11,28	12,37
CI	9,85	17,84	15,80	24,52	33,59	9,72

Fonte: Do autor (2020)

### 2.3 Dados de precipitação e temperatura média

Os dados de precipitação total mensal e temperatura média mensal foram obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir das informações coletadas pela Estação Meteorológica Convencional instalada no município de Lavras, que é a estação mais próxima ao local do experimento. A Figura 2 mostra os valores de precipitação total e temperatura média para o período de estudo.

Figura 2 - Distribuição de chuvas e temperatura média na região durante o período estudado.



Fonte: INMET (2019)

## 2.4 Medição da resistividade elétrica do solo em campo

As leituras de resistividade foram obtidas com Resistivímetro modelo X5xtal 250 (Auto Energia, Minas Gerais, Brasil), com auxílio de dois multímetros. O trabalho foi conduzido em arranjo dipolo-dipolo (SAMOUËLIAN et al., 2005), sendo os eletrodos dispostos transversalmente à linha de cultivo e espaçados 0,18 m entre si. Esse arranjo permitiu a avaliação da resistividade elétrica aparente do perfil de solo até 0,60 m de profundidade com resolução de 0,05m. Ao todo foram realizadas 126 leituras por tratamento nos meses de setembro/2018, fevereiro/2019 e agosto/2019 nos três porta-enxertos (CSC, ST e CI), na área de mata secundária e na entrelinha vegetada com braquiária (FIGURA 1). Salienta-se que o transecto foi posicionado sempre no mesmo local em cada tratamento: centrado no tronco da planta e distante cerca de 0,30 m desse.

A partir dos dados obtidos em campo calculou-se a resistividade elétrica aparente, por meio da equação 4.

$$\rho_a = \pi n(n + 1)(n + 2)a \Delta V / I \quad (4)$$

onde  $\rho_a$ : resistividade elétrica aparente ( $\Omega$  m); n: nível da leitura (adimensional); a: espaçamento entre os eletrodos (m);  $\Delta V$ : diferença de potencial devido à aplicação de corrente elétrica (mV); I: corrente elétrica injetada (mA).

Logo, como a resistividade elétrica aparente permite uma interpretação qualitativa, foi necessário realizar o processo de inversão dos dados para obtenção da resistividade elétrica real ( $\rho$ ), que permite uma análise quantitativa dos mapas (SAMOUËLIAN et al., 2005). O processo de inversão foi feito por meio do programa RES2Dinvx64 versão 4.08 (Geotomo Software). Após esse procedimento, utilizando o método de triangulação para a interpolação dos pontos, mapas 2D com os valores de  $\rho$  foram gerados por meio do programa Surfer 13.5.583 (64-bit) (Golden Software).

## 2.5 Descrição do ensaio de calibração em laboratório

A resistividade elétrica pode ser usada para estimar a umidade do solo ( $\theta$ ) *in situ*, utilizando calibrações realizadas em laboratório a partir do método da estufa (SAMOUËLIAN et al., 2005), que é o padrão de determinação. A obtenção e modelagem da relação  $\rho$ - $\theta$  em laboratório tem sido utilizada em vários estudos (CALAMITA et al., 2012; JAYAWICKREME; DAM; HYNDMAN, 2010; MA; VAN DAM; JAYAWICKREME, 2014; MICHOT et al., 2003; WHALLEY et al., 2017), principalmente pela facilidade e agilidade em

obter uma ampla faixa de variação da umidade (MICHOT et al., 2003). Para tanto, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros de plástico rígido com 0,10 m de diâmetro e 0,10 m de altura. As amostras foram retiradas em triplicata em duas camadas (0-0,10 e 0,35-0,45 m) representativas dos horizontes A e B, sendo uma amostra por camada no sulco de plantio dos três porta-enxertos e três amostras por camada na área de mata nativa.

Em laboratório as amostras foram preparadas removendo-se o excesso de solo. Na sequência foram submetidas à saturação com água, lentamente, por capilaridade, durante um período mínimo de 72 horas. Na sequência, iniciou-se o processo de calibração, sendo tomadas leituras à medida que as amostras iam perdendo água por evaporação naturalmente.

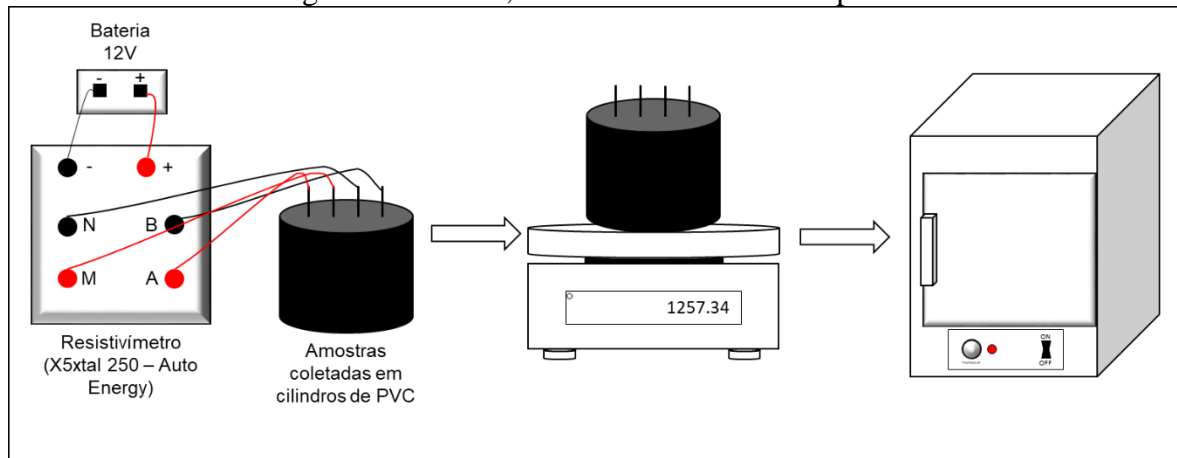
As leituras de resistividade foram realizadas com Resistivímetro modelo X5xtal 250 (Auto Energia, Minas Gerais, Brasil), com auxílio de dois multímetros. O ensaio foi conduzido em arranjo Wenner (SAMOUËLIAN et al., 2005), unidimensional, com quatro eletrodos dispostos na ordem A M N B espaçados 0,019 m entre si e inseridos a uma profundidade de 0,05 m. As leituras foram realizadas durante 18 dias, e a resistividade elétrica da água foi considerada constante durante o processo. A resistividade elétrica do solo foi calculada como segue:

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

onde  $\rho$ : resistividade elétrica ( $\Omega$  m);  $a$ : separação entre os eletrodos (m);  $b$ : profundidade de inserção do eletrodo na amostra;  $\Delta V$ : diferença de potencial devido à aplicação de corrente elétrica (mV);  $I$ : corrente elétrica injetada (mA).

Para cada leitura as amostras foram pesadas para o cálculo da umidade do solo no momento da análise. Ao final do último dia de leitura as amostras foram levadas para estufa a 105-110°C durante 48h para determinação da massa seca de solo, para cálculo da umidade gravimétrica ( $U$ ) e densidade do solo ( $D_s$ ) (Blake and Hartge, 1986). A umidade volumétrica ( $\theta$ ) foi obtida pela relação  $\theta = U(D_s/D_a)$ , onde  $\theta$ : umidade volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ );  $U$ : umidade gravimétrica ( $kg kg^{-1}$ );  $D_s$ : densidade do solo ( $g cm^{-3}$ );  $D_a$ : densidade da água (considerada como  $1 g cm^{-3}$ ). A Figura 3 mostra um esquema simplificado do processo de obtenção dos dados.

Figura 3 - Fluxograma do processo de obtenção dos dados: após a medição da resistividade elétrica as amostras eram imediatamente pesadas, o que ocorreu 18 vezes sucessivas durante a secagem da amostra, e ao final foram levadas para estufa a 105-110°C.



Fonte: Do autor (2020)

## 2.6 Análises estatísticas

Inicialmente, os dados de  $\theta$  em função da  $\rho$  para cada porta-enxerto e para a área de mata obtidos em laboratório foram plotados, e verificou-se para todos uma tendência não linear, o que corrobora com outros trabalhos da literatura (BESSON et al., 2010; BRILLANTE et al., 2015; CALAMITA et al., 2012; CELANO et al., 2011; SAMOUËLIAN et al., 2005), e também se tem registro para solos tropicais (FERREIRA et al., 2007; GARCIA-MONTIEL et al., 2008). Dessa forma, os dados de  $\theta$  em função de  $\rho$  foram ajustados ao modelo potencial ( $\theta = a\rho^b$ ), onde  $\theta$ : umidade volumétrica do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\rho$ : resistividade elétrica ( $\Omega \text{m}$ ); a e b: parâmetros de ajustes dos modelos.

Destaca-se que o modelo potencial tem a mesma forma analítica da relação  $\theta$ - $\rho$  semi-empírica conhecida como “Lei de Archie” (ARCHIE, 1942). Para verificar a acurácia do modelo  $\theta$ - $\rho$  de cada situação avaliada, utilizou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre os valores observados e os valores preditos de  $\theta$ . Além disso, o teste t foi aplicado para avaliar a significância dos dois parâmetros estimados.

## 2.7 Elaboração dos mapas de umidade do solo

Foram elaborados mapas de  $\theta$  a partir das equações de calibração específicas por tratamento (porta-enxertos e mata) para cada situação e época amostrada. Ressalta-se que para a estimativa da  $\theta$  na entrelinha vegetada foi utilizada a equação de calibração obtida para a área

de mata, pois em ambas não foi realizado o preparo do solo. Esse processo foi realizado no programa QGis versão 3.8.3, por meio da ferramenta “Calculadora Raster”.

Para obter informações sobre a dinâmica temporal da resistividade elétrica e da umidade do solo foram gerados mapas de diferença entre setembro/2018 e fevereiro/2019 e entre fevereiro/2019 e agosto/2019 para cada situação avaliada. Os mapas resultantes possibilitam inferências acerca da variação espaço-temporal da  $\rho$  e da  $\theta$  entre as estações. Os cálculos das diferenças percentuais de resistividade elétrica ( $[(\rho_{n+1} - \rho_n) / \rho_n]100$ ) e umidade do solo ( $[(\theta_{n+1} - \theta_n) / \rho_n]100$ ) foram realizados seguindo o descrito por Ma, Van Dam e Jayawickreme (2014). Esse processo foi realizado no programa QGis versão 3.8.3, por meio da ferramenta “Calculadora Raster”.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Calibração**

A resistividade elétrica é função de várias propriedades do solo, incluindo a estrutura à qual é relacionada à densidade do solo, porosidade, distribuição de tamanho de poros e sua conectividade (JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017; KOWALCZYK; MAŚLAKOWSKI; TUCHOLKA, 2014; ROMERO-RUIZ et al., 2018; SAMOUËLIAN et al., 2005). Portanto, ao assumir uma relação entre  $\rho$  e  $\theta$ , o efeito de outros fatores deve ser considerado caso a caso (VANELLA et al., 2018), o que pode ser feito a partir de equações de calibração (MICHOT et al., 2003). No presente estudo foram realizadas por tratamento objetivando melhor exatidão para estimar a  $\theta$ , análogo ao realizado por Dick et al. (2018).

A fim de obter a relação entre umidade do solo e resistividade elétrica, os dados de  $\theta$  e  $\rho$  de cada situação avaliada foram ajustados ao modelo potencial. Os parâmetros das equações de calibração para cada porta-enxerto e para a área de mata são apresentados na Tabela 4. Os parâmetros de ajuste  $a$  e  $b$  foram significativos ( $p < 0,01$ ) para todos os modelos ajustados. No entanto, pela análise do intervalo de confiança, observa-se que eles não diferem entre os tratamentos.

Ao se avaliar o ajuste dos modelos pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), observou-se que o modelo da área de mata foi o que apresentou melhor ajuste, com maior valor de  $R^2$  (0,79), seguido pelo porta-enxerto CSC ( $R^2 = 0,73$ ), CI ( $R^2 = 0,53$ ) e ST ( $R^2 = 0,44$ ). Os valores de  $R^2$  encontrados estão próximos dos observados por Calamita et al. (2012), que variaram de 0,56 a 0,70, ao estudarem a relação  $\theta$ - $\rho$  em diferentes solos. Esses resultados são importantes, uma vez que a maioria dos registros de calibração ocorrem para solos sob clima temperado (AL

HAGREY et al., 2004; CALAMITA et al., 2012; CELANO et al., 2011; MA; VAN DAM; JAYAWICKREME, 2014; MICHOT et al., 2003; SELADJI et al., 2010), havendo poucos registros para solos sob clima tropical. Garcia-Montiel et al. (2008) alcançou  $R^2$  de 0,78 com modelo polinomial quadrático em um Latossolo (Acrustox) no Cerrado, Brasil.

Tabela 4 - Equações de calibração para cada porta-enxerto e área de mata, raiz do erro médio quadrático (RMSE) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Tratamento	<i>a</i>	EP <i>a</i>	<i>b</i>	EP <i>b</i>	<i>a</i> (IC, 95%)	<i>b</i> (IC, 95%)	RMSE ( $m^3 m^{-3}$ )	$R^2$	n
Mata	1,362	0,124	-0,268	0,015	[1,141;1,634]	[-0,299;-0,239]	0,040	0,79	107
CSC	1,291	0,222	-0,309	0,037	[0,920;1,828]	[-0,385;-0,238]	0,049	0,73	35
ST	1,077	0,321	-0,240	0,057	[0,599;2,042]	[-0,363;-0,130]	0,062	0,44	30
CI	1,050	0,254	-0,224	0,044	[0,658;1,717]	[-0,316;-0,140]	0,064	0,53	32

n: tamanho do conjunto amostral utilizado para a modelagem; *a* e *b*: coeficientes dos modelos; EP: erro padrão dos coeficientes; IC, 95%: intervalo de confiança dos coeficientes ao nível de 95%; RMSE: raiz quadrada do erro médio;  $R^2$ : coeficiente de determinação do modelo.

Fonte: Do autor (2020)

Em relação à raiz do erro médio quadrático (RMSE), menores valores indicam maior exatidão para os modelos. Os menores valores foram encontrados para área de mata ( $0,040 m^3 m^{-3}$ ), seguido pelo porta-enxerto CSC ( $0,049 m^3 m^{-3}$ ). Já os valores de RMSE encontrados para os modelos dos porta-enxertos CI ( $0,064 m^3 m^{-3}$ ) e ST ( $0,062 m^3 m^{-3}$ ) são maiores do que considerado como limite ( $0,05 m^3 m^{-3}$ ) (BRILLANTE et al., 2015; CALAMITA et al., 2012). A qualidade do ajuste dos modelos pode estar refletindo as poucas leituras realizadas quando a umidade do solo estava muito baixa, uma vez que à medida que solo vai se tornando mais seco torna-se mais difícil a obtenção de dados, como também reportado por Seladji et al. (2010). Apesar disso, a medição da  $\rho$  apresenta-se como ferramenta útil e alternativa para medição da dinâmica da  $\theta$  em solos tropicais, pois pelos modelos ajustados, próximo de 80% da variação da umidade na área de mata foi explicada pela  $\rho$ , com erro aceitável.

### 3.2 Mapas de resistividade elétrica e umidade do solo para cada época avaliada

Nas Figuras 4 a 6 são apresentadas a distribuição espacial da resistividade elétrica após processo de inversão (mapas da esquerda) e da umidade volumétrica estimada (mapas da direita) para cada época e situação avaliada. Os valores localizados no canto inferior esquerdo dos mapas de  $\rho$  indicam o erro absoluto (EA) após a inversão dos dados. Os maiores valores de

EA foram observados na avaliação de agosto/2018, o que é explicado pela maior dificuldade em estabelecer um bom contato entre os eletrodos e o solo seco, o que afeta as medições elétricas e a precisão da inversão de resistividade (SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009).

Apesar de alguns valores de EA observados serem maiores que 10%, pode-se dizer que o modelo de inversão dos mapas apresentou ajuste satisfatório, uma vez que os valores médios de EA variaram de 4,76% (fevereiro/2019) e 7,68% (agosto/2019). Ainda, os resultados encontrados estão próximos aos observados por Vanella et al. (2018), em que processos de inversão da  $\rho$  convergiram com erros variando de 10% a 16%, e Beff et al. (2013) que obtiveram erros de aproximadamente 9%.

Por outro lado, os valores encontrados são superiores aos encontrados em estudos conduzidos em solos de clima temperado, a exemplo de Ma, Van Dam e Jayawickreme (2014) e Srayeddin e Doussan (2009), evidenciando a necessidade de mais estudos para solos de clima tropical para determinar os modelos mais adequados para explicar a relação  $\theta$ - $\rho$ , que podem diferenciar daqueles determinados para solo de clima temperado. Devido às condições que se desenvolveram os solos de clima temperado são menos intemperizados, apresentando maior fertilidade e quantidade de argilas 2:1, o que afeta diretamente os mecanismos de transmissão do solo (Calamita et al., 2012; Seladji et al., 2010).

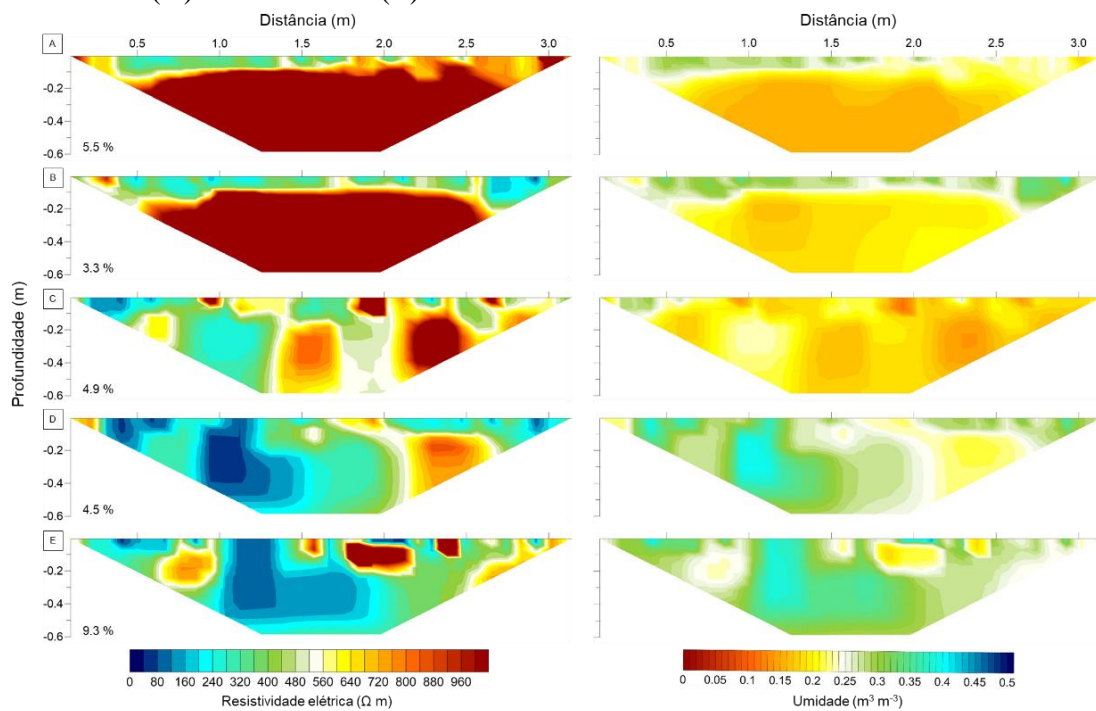
O monitoramento da  $\theta$  ao longo do ano permite inferir sobre a absorção de água ao longo do perfil do solo, uma vez que a transpiração das plantas e, logo a extração de água do solo pelas raízes é uma das principais fontes de alteração da água armazenada (SILVA et al., 2015). Ainda, Consoli et al. (2017) afirmam que as variações espaciais e temporais de  $\rho$  são impulsionadas pela dinâmica da  $\theta$  e processos de redistribuição relacionados, principalmente pela extração de água pelas plantas. Assim, os padrões da variação de  $\rho$  ao longo do tempo (Figuras 4 a 6), podem ser principalmente associados a extração de água pela planta. Por outro lado, analisando em separado cada época avaliada, pode-se comparar as situações em estudo (uso e manejo do solo) e inferir os efeitos das alterações na estrutura do solo.

De maneira geral, observa-se que a área de mata (FIGURAS 4A, 5A e 6A) apresentou maior  $\rho$ , e, portanto, menor  $\theta$  quando comparada às demais áreas. Nas avaliações de setembro/2018 (FIGURA 4A) e fevereiro/2019 (FIGURA 5A) pode-se verificar os maiores valores de  $\theta$  na camada superficial, até aproximadamente 0,10 m, e à medida que se aprofunda no perfil do solo os valores decrescem.

Assim, apesar do volume acumulado de chuva nos 15 dias que antecederam a análise de campo ter sido significativo (47,4 mm em setembro/2018 e 104,9 mm em fevereiro/2019) (INMET, 2019), a presença da camada adensada dificultou a percolação de água para as

camadas mais profundas, o que é evidenciado pelos menores valores de condutividade hidráulica saturada encontradas para essa área em comparação àquelas que foram submetidas ao preparo do solo (TABELA 3). Nesse sentido, Silva (2018) avaliou os efeitos do preparo profundo do solo em um Cambissolo, que também apresenta uma camada de impedimento, e verificou maior condutividade hidráulica saturada nos tratamentos em que o preparo do solo foi realizado até 0,60 m e 0,80 m de profundidade em relação à área de mata. Barbosa et al. (2020) nessa mesma área experimental observaram maior conteúdo de água disponível nas profundidades de 0,20 m até 0,60 m nas áreas que foram submetidas ao preparo profundo quando comparada à área de vegetação nativa.

Figura 4 - Distribuição espacial da resistividade elétrica invertida (mapas da esquerda) e da umidade estimada (mapas da direita) para o mês de setembro/2018 (primavera) para cada situação avaliada: (A) mata (B) entrelinha coberta com braquiária (C) citros sob CSC (D) citros sob ST (E) citros sob CI.

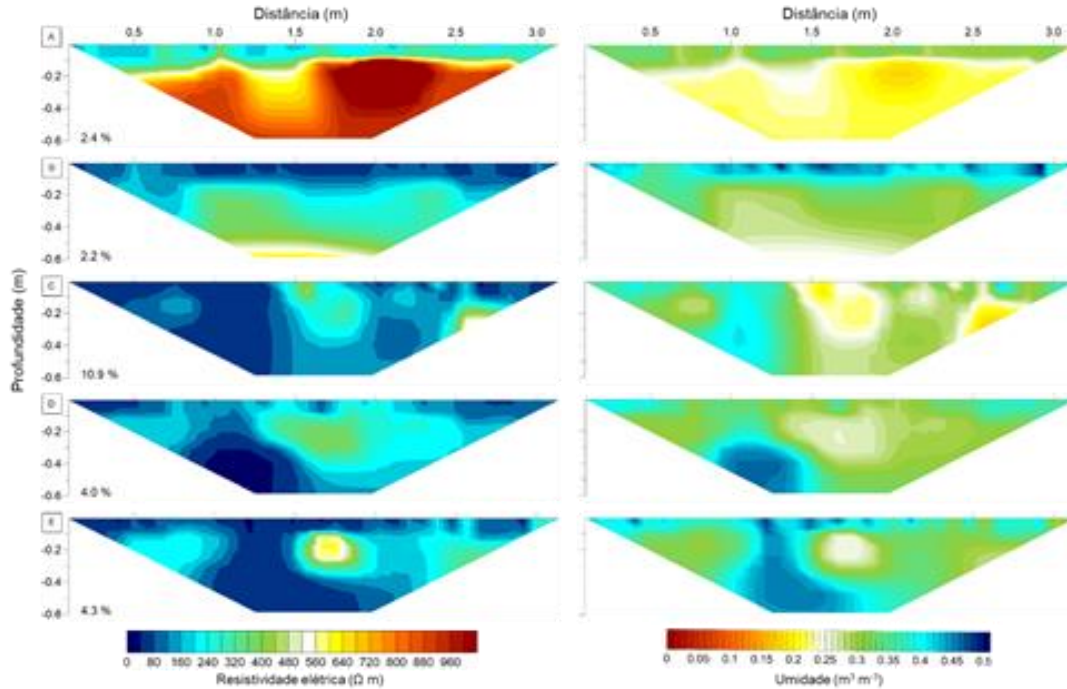


Os valores percentuais no lado inferior esquerdo indicam o erro absoluto após a inversão dos dados.

Fonte: Do autor (2020)

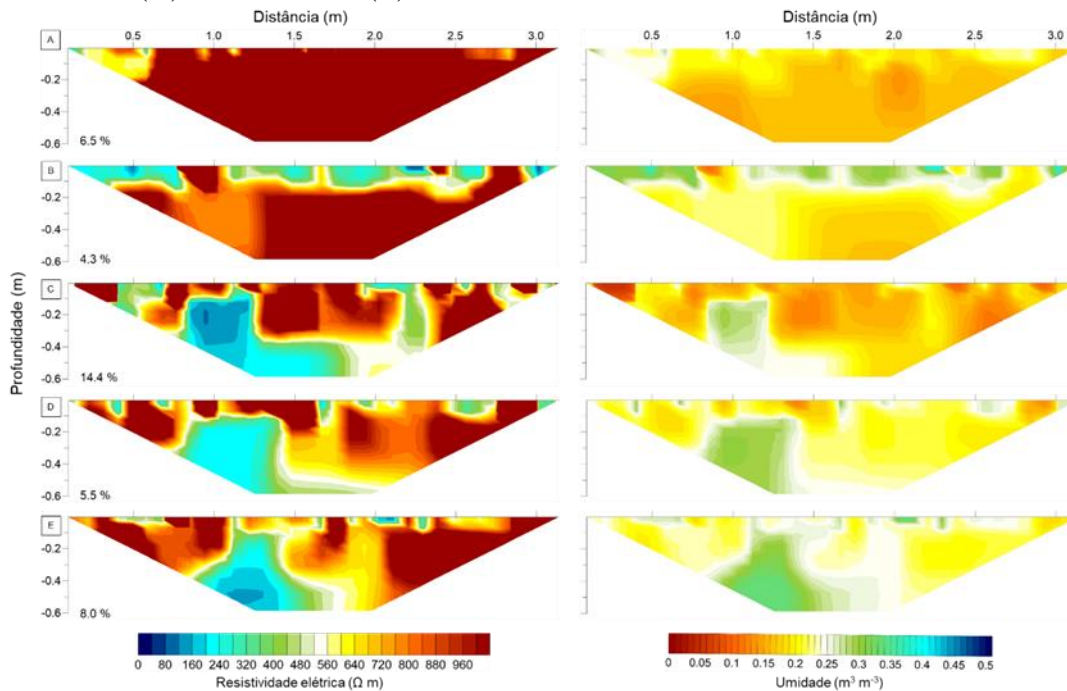


Figura 5 - Distribuição espacial da resistividade elétrica invertida (mapas da esquerda) e da umidade volumétrica (mapas da direita) para o mês de fevereiro/2019 (verão) para cada situação avaliada: (A) mata (B) entrelinha coberta com braquiária (C) citros sob CSC (D) citros sob ST (E) citros sob CI.



Os valores percentuais no lado inferior esquerdo indicam o erro absoluto após a inversão dos dados.  
Fonte: Do autor (2020)

Figura 6 - Distribuição espacial da resistividade elétrica invertida (mapas da esquerda) e da umidade volumétrica (mapas da direita) para o mês de agosto/2019 (inverno) para cada situação avaliada: (A) mata (B) entrelinha coberta com braquiária (C) citros sob CSC (D) citros sob ST (E) citros sob CI.



Os valores percentuais no lado inferior esquerdo indicam o erro absoluto após a inversão dos dados.  
Fonte: Do autor (2020)

O preparo profundo pode aumentar o armazenamento de água no solo, principalmente do conteúdo disponível às plantas devido ao aumento do volume dos poros intermediários criados, que são os responsáveis pela retenção da água no solo e disponibilização dessa para as plantas (CARDUCCI et al., 2015; SCHNEIDER et al., 2017). Nesse sentido, Silva et al. (2019) mediram a  $\theta$  ao longo dos meses de abril a novembro em Latossolo submetido ao preparo profundo (subsolagem a 0,60 m de profundidade), e observaram que na camada de 1,0 m os valores de  $\theta$  estiveram acima do valor considerado mínimo (umidade crítica) para a atividade máxima da planta, evidenciando a importância de sistemas de manejo que promovam o armazenamento de água no solo, principalmente em subsuperfície.

No mês de agosto/2019 (FIGURA 6A) o padrão de  $\theta$  observado nas análises anteriores não se repetiu, sendo que ao longo de todo perfil os valores encontrados foram baixos. Essa avaliação foi realizada no auge do período seco na região, e de acordo com o banco de dados no INMET (INMET, 2019) nos 60 dias que precederam a leitura choveu na região apenas 9,3 mm. Logo esses resultados são reflexos da ausência de chuvas significativas aliado ao menor armazenamento de água em profundidade dos meses anteriores devido à ausência de preparo dessa área como discutido anteriormente.

Ao analisar as imagens da área de entrelinha coberta por braquiária (FIGURAS 3B, 4B e 5B) observa-se que essa apresenta padrão semelhante ao observado na área de mata no mês de setembro/2018 (FIGURA 4B). Esses resultados estão relacionados à baixa infiltração de água nessa área (TABELA 2), como consequência da compactação pelo intenso tráfego de máquinas na lavoura, aliada à presença de uma camada adensada - devido a causas pedogenéticas - que dificulta a drenagem de água no solo, evidenciada pela baixa  $K_s$  nessa área (TABELA 3), e que não foi rompida pela ausência de preparo do solo (sulcamento, subsolagem e gradeamento) na entrelinha.

Por outro lado, nos meses de fevereiro/2019 (FIGURA 5B) e agosto/2019 (FIGURA 6B) na entrelinha foi observado maior  $\theta$  na camada 0-0,10 m em relação à área de mata, o que é atribuído à combinação da compactação com a baixa infiltração de água (TABELA 2), com que fez que a água empossasse na superfície, saturando rapidamente os poros do horizonte superficial na época das chuvas (FIGURA 5B).

No entanto, na época de seca (FIGURA 6B) a presença da braquiária na entrelinha pode ter ajudado a reter umidade nas camadas superficiais para esse tratamento. Nesse sentido, Rocha et al. (2016) avaliaram o efeito da manutenção da entrelinha vegetada em lavoura cafeeira sob Latossolo Vermelho, e observaram que a presença da braquiária aumentou em 14% volume de mesoporos responsáveis pela retenção de água no solo nas camadas até 0,20 m, quando

comparado ao sistema sem cobertura na entrelinha, o que refletiu em um aumento de 18% do conteúdo de água prontamente disponível nessas camadas. Segundo os autores, esses resultados são explicados pela ação agregadora das raízes da braquiária (SILVA et al., 2016), que melhora a qualidade física do solo e conserva a umidade do solo nas paisagens (QU et al., 2019).

Ainda, Fidalski et al. (2007) e Fidalski e Tormena (2007) avaliaram o impacto de sistemas de manejo com cobertura permanente do solo em alguns indicadores de qualidade física. A área experimental estava instalada em pomar de laranjeira 'Pêra' (*Citrus sinensis* (L.) Osb.) enxertada sobre o limoeiro 'Cravo' (*Citrus limonia* Osb.) em Argissolo Vermelho distrófico latossólico. Os autores verificaram que a manutenção da vegetação das entrelinhas vegetadas com a gramínea, melhora a qualidade física do solo nas posições de rodado e enterrodado.

Como discutido anteriormente, pode-se observar que a camada 0-0,10 m da entrelinha apresentou maior  $\theta$  quando comparado às avaliações realizadas nos sulcos de plantio. No entanto, em camadas mais profundas os valores de  $\theta$  dos porta-enxertos ST (FIGURAS 4D, 5D e 6D) e CI (FIGURAS 4E, 5E e 6E) foram maiores do que aqueles encontrados na entrelinha. O sulco de plantio foi submetido ao preparo profundo, que rompeu a camada adensada, proporcionando maior redistribuição da água ao longo do perfil do solo, o que pode explicar esses resultados. Porém, nas camadas abaixo de 0,10 m o porta-enxerto CSC (FIGURAS 4C, 5C e 6C) apresentou menor  $\theta$  em relação à entrelinha, o que está relacionado ao maior crescimento de raízes desse porta-enxerto, como será discutido abaixo.

Dentre os porta-enxertos, o CSC foi o que apresentou maior  $\rho$  e menor  $\theta$  para todas as épocas avaliadas, tanto no sentido vertical quanto horizontal do perfil do solo. Esse resultado indica maior sistema radicular desse porta-enxerto em relação aos demais, que proporcionou maior absorção de água pela planta reduzindo a  $\theta$ . Esses resultados corroboram com os encontrados por Benevenute (2019) que, ao avaliar a distribuição espacial do número de raízes nessa mesma área experimental e no mesmo período, observou que o CSC foi o porta-enxerto que apresentou maior quantidade de raízes. Além disso, esse PE possui melhor distribuição dessas raízes até 0,50 m, englobando todas as posições de coleta (E, S e D).

Independentemente do porta-enxerto estudado, os maiores valores de  $\rho$  e menores de  $\theta$  foram observados próximos ao centro do transecto, correspondente ao tronco da planta (posição S). Esses resultados se devem ao maior crescimento de raízes nessa posição, e está relacionado à ação da haste do subsolador, que proporcionou boas condições para o aprofundamento das raízes. Benevenute (2019) também observou maior número de raízes no centro do sulco de

plantio, próximo ao tronco da planta, o que corrobora os resultados encontrados no presente trabalho.

Além disso, observou-se que para todos os porta-enxertos avaliados os maiores valores de  $\rho$  e menores de  $\theta$  foram encontrados até a profundidade de 0,20 m, o que também foi encontrado em outros estudos de variação espaço-temporal da  $\rho$  ao longo do desenvolvimento do citros (CONSOLI et al., 2017; VANELLA et al., 2018), e de outras culturas como maçã (CASSIANI et al., 2016), milho e sorgo (SRAYEDDIN; DOUSSAN, 2009). É nessa camada que a maior parte do sistema radicular das plantas se desenvolve, logo, é onde há maior consumo de água, resultando em menores valores de  $\theta$ . Além disso, essa camada é a que está mais susceptível à perda de água por evaporação (BRUNET; CLÉMENT; BOUVIER, 2010; SILVA et al., 2015).

### **3.3 Mapas da variação da resistividade elétrica e umidade do solo entre as épocas avaliadas**

Nas Figuras 7 e 8 são mostradas as variações percentuais da  $\rho$  e  $\theta$ , respectivamente, entre os meses de setembro/2018 e fevereiro/2019 (mapas da esquerda) e entre os meses de fevereiro/2019 e agosto/2019 (mapas da direita) para as situações avaliadas. Foi possível observar que houve uma grande influência do clima na  $\rho$  e  $\theta$  entre os períodos estudados, como já era esperado (JAYAWICKREME; VAN DAM; HYNDMAN, 2008; MA; VAN DAM; JAYAWICKREME, 2014).

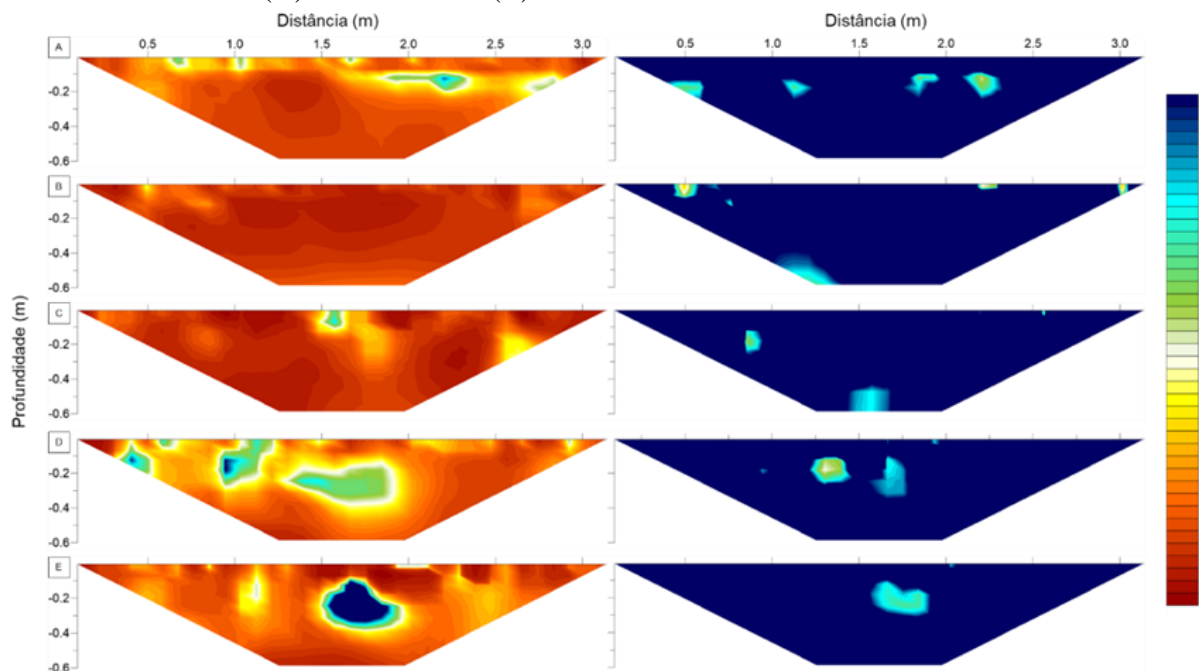
De forma geral, observou-se uma variação positiva de  $\theta$  e negativa de  $\rho$  entre os meses de setembro/2018 e fevereiro/2019. No período de fevereiro/2019 a agosto/2019 foi observado o inverso, ou seja, a  $\rho$  aumentou e a  $\theta$  diminuiu. Esses resultados podem ser explicados pelo regime hídrico na região, onde entre os meses de setembro e outubro tem-se o período chuvoso, com um grande volume de chuvas principalmente entre os meses de dezembro e março (FIGURA 2). Logo, entre essas avaliações houve o abastecimento de água no solo. Já entre os meses de fevereiro e agosto, tem-se o período de seca, com menor entrada de água no solo, o que pode ser confirmado pelo baixo volume precipitado entre os meses de maio/2019 a agosto/2019, equivalente a 46,5 mm (FIGURA 2), explicando essa variação negativa de umidade do solo.

Com relação aos usos do solo, de forma geral, houve maiores variações positivas de  $\theta$  e negativas de  $\rho$  para o CSC entre os meses de setembro/2018 e fevereiro/2019 (FIGURAS 7 e 8), sendo maior que a área de mata. Esse tratamento também apresentou as maiores variações

positivas de  $\rho$  e negativas de  $\theta$  entre fevereiro/2019 e agosto/2019 em relação aos demais porta-enxertos (FIGURAS 7C, 7D, 7E e 8C, 8D, 8E). Esses resultados confirmam o maior crescimento radicular desse porta-enxerto, como discutido anteriormente.

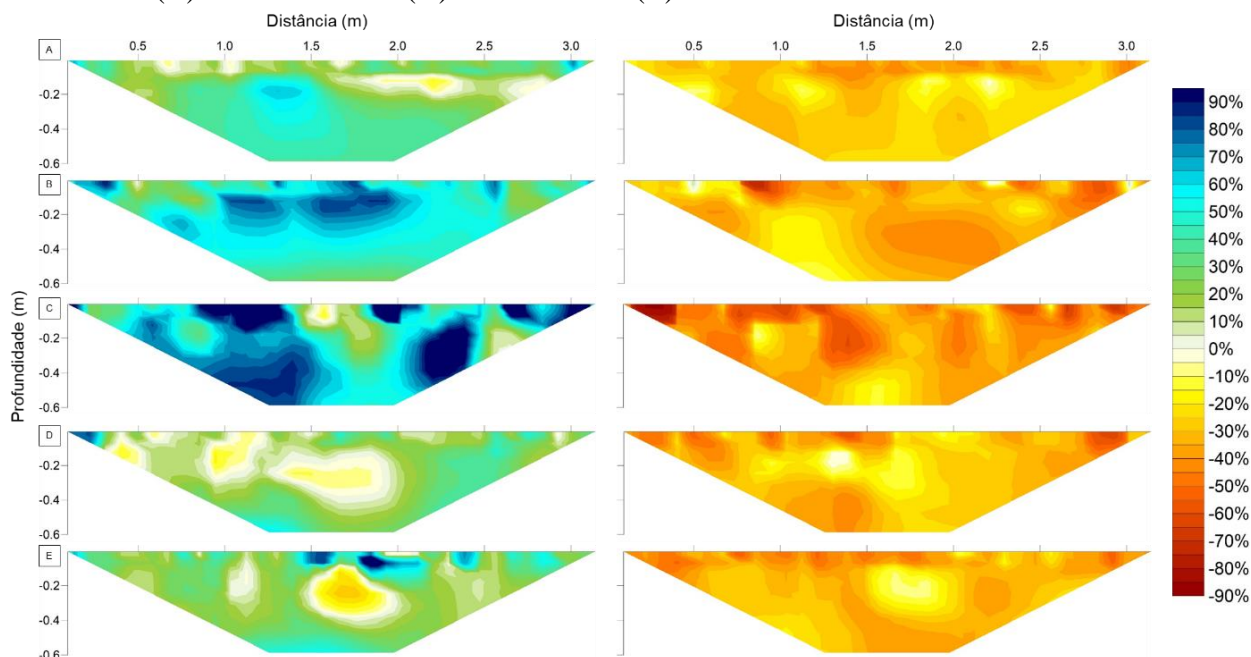
As raízes das plantas têm importante papel na estruturação do solo, a partir da liberação de exsudatos, criação de bioporos e agregação de partículas (KIHARA et al., 2012; REICHERT et al., 2016; SILVA et al., 2016). Logo, com o aumento do sistema radicular das plantas é esperado uma melhor agregação das partículas do solo, favorecendo a retenção e recarga de água no período chuvoso. Além disso, evidencia-se os benefícios do preparo profundo do solo, confirmando que o uso do solo afeta diretamente as taxas de recarga de água subterrâneas (JAYAWICKREME; VAN DAM; HYNDMAN, 2008; MENEZES et al., 2016; PINTO et al., 2017).

Figura 7 - Variação percentual da resistividade elétrica entre setembro/2018 e fevereiro/2019 (mapas da esquerda) e entre fevereiro/2019 e agosto/2019 (mapas da direita) para cada situação avaliada: (A) mata (B) entrelinha coberta com braquiária (C) citros sob CSC (D) citros sob ST (E) citros sob CI.



Fonte: Do autor (2020)

Figura 8 - Variação percentual de umidade volumétrica do solo entre setembro/2018 e fevereiro/2019 (mapas da esquerda) e entre fevereiro/2019 e agosto/2019 (mapas da direita) para as situações avaliadas: (A) mata (B) entrelinha coberta com braquiária (C) citros sob CSC (D) citros sob ST (E) citros sob CI.



Fonte: Do autor (2020)

Por outro lado, na época de baixa precipitação, o maior número de raízes acarretou maior consumo de água pela planta, gerando uma variação mais negativa de  $\theta$  e positiva de  $\rho$  no tratamento CSC em relação aos demais. Benevenuto (2019) em avaliação conduzida na mesma área experimental, observou que o CSC apresentou melhor uso da água em relação aos demais, principalmente na camada 0,30-0,35m. Segundo o autor, esse resultado está relacionado à maior distribuição espacial em relação ao número e diâmetro das raízes, além de possuir maior relação de raízes finas e muito finas, indicando maior absorção de água e nutrientes. Esse maior consumo resultou em maior produtividade das plantas sob CSC ( $23,5 \text{ kg planta}^{-1}$ ), diferindo de ST ( $10,0 \text{ kg planta}^{-1}$ ) e CI ( $10,5 \text{ kg planta}^{-1}$ ), o que é corroborado pela relação significativa encontrada entre produtividade e uso da água, sendo que maior produtividade induz no uso intensivo da água (Benevenuto, 2019). Ou seja, à medida que raízes absorvem água, há redução do conteúdo de água no perfil do solo.

Segundo Barco, Maucieri e Borin (2018) a produtividade das culturas perenes se deve à relação direta com aspectos associados ao sistema radicular bem como ao balanço hídrico no solo, maior número e exploração de raízes e no estabelecimento das plantas em campo (BOWMAN; ALBRECHT, 2017). Assim, o uso de porta-enxertos que se diferenciam quanto

ao vigor, além da produtividade, afetam a qualidade dos frutos, como observado no caso de vinhos (ROMERO et al., 2019), o que é influenciado pela água no solo.

Além disso, entre os meses de setembro/2018 e fevereiro/2019 os porta-enxertos ST e CI apresentaram variação positiva da  $\rho$  e negativa de  $\theta$  próximas ao centro do transecto e nas profundidades entre 0,20 m e 0,40 m (FIGURA 8 D e E). Como discutido anteriormente, o maior desenvolvimento radicular foi próximo ao tronco da planta, logo, esse resultado pode estar relacionado à maior demanda vegetativa por água do solo que superou a contribuição da precipitação (MA; VAN DAM; JAYAWICKREME, 2014).

Ao comparar os perfis da entrelinha e da mata observa-se que a presença da braquiária favoreceu o maior armazenamento de água em superfície no período de chuvas. No entanto, na época de seca não foram observadas grandes diferenças entre as duas áreas, mas na camada superficial da entrelinha houve maior variação de  $\theta$ . Esses resultados também podem estar relacionados à presença das raízes da braquiária, que possuem papel fundamental na agregação do solo, como discutido anteriormente.

#### **4 CONCLUSÕES**

A partir dos dados obtidos para a condição experimental estudada, as hipóteses do presente trabalho foram confirmadas.

O uso da resistividade elétrica do solo mostrou-se uma potencial ferramenta para estimar a umidade do solo em Argissolo, e o modelo potencial foi capaz de explicar até cerca de 80% da variação de umidade volumétrica pela resistividade elétrica.

A partir dos mapas de variação de umidade volumétrica e resistividade elétrica foi possível inferir que, dentre os porta-enxertos avaliados, o Cravo Santa Cruz foi o que apresentou maior absorção de água, devido a maior distribuição do sistema radicular. Além disso, esse porta-enxerto parece ter favorecido a retenção e o armazenamento de água no solo durante o período chuvoso (setembro a fevereiro), em função dos benefícios acarretados pelo maior crescimento radicular.

O preparo profundo do solo favoreceu a redistribuição de água no perfil do solo, evidenciado pela menor umidade do solo para as camadas mais profundas nos tratamentos que não foram submetidos às operações de preparo da área.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519–531, 2004.
- AL HAGREY, S. A. et al. Hydro-, bio-geophysics. **The leading edge**, v. 23, n. 7, p. 670–674, 2004.
- ALAMRY, A. S. et al. Spatial and temporal monitoring of soil moisture using surface electrical resistivity tomography in Mediterranean soils. **Catena**, v. 157, p. 388–396, 2017.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ARCHIE, G. E. The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics. **Transactions of the AIME**, v. 146, n. October, p. 54–62, 1942.
- BARBOSA, S. M. et al. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. **Geoderma**, v. 357, n. September 2019, p. 113934, 2020.
- BARCO, A.; MAUCIERI, C.; BORIN, M. Root system characterization and water requirements of ten perennial herbaceous species for biomass production managed with high nitrogen and water inputs. **Agricultural Water Management**, v.196, p.37–47, 2018.
- BASTOS, D. C.; FERREIRA, E. A.; PASSOS, O. S.; SÁ J. F.; ATAÍDE, E. M.; CALGARO, M. Cultivares copa e porta-enxertos para a citricultura brasileira. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.35, p.36-45, 2014.
- BEFF, L. et al. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using Electrical Resistivity Tomography. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 2, p. 595–609, 2013.
- BENEVENUTE, P. A. N. **Efeitos do preparo do sulco de plantio nos atributos físico-hídricos do solo, no desenvolvimento radicular de plantas e em parâmetros de produção do Citros**. 2019. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- BESSON, A. et al. The spatial and temporal organization of soil water at the field scale as described by electrical resistivity measurements. **European Journal of Soil Science**, v. 61, n. 1, p. 120–132, 2010.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 363–375.
- BOWMAN, K. D.; ALBRECHT, U. Efficient propagation of citrus rootstocks by stem cuttings. **Scientia Horticulturae**, v.225, p.681-688, 2017.
- BRILLANTE, L. et al. The use of soil electrical resistivity to monitor plant and soil water



relationships in vineyards. **Soil**, v. 1, p. 273–286, 2015.

BRUNET, P.; CLÉMENT, R.; BOUVIER, C. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) - A case study in the Cevennes area, France. **Journal of Hydrology**, v. 380, p. 146–153, 2010.

CALAMITA, G. et al. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. **Journal of Hydrology**, v. 454–455, p. 101–112, 2012.

CARDUCCI, C. E. et al. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 3, p. 284–291, 2015.

CARRIÈRE, S. D. et al. Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: insights from Electrical Resistivity Tomography. **Science of the Total Environment**, v. 698, p. 134247, 2020.

CARVALHO, L. M.; CARVALHO, H. W. L.; SOARES FILHO, W. S.; MARTINS, C. R.; PASSOS O. S. Porta-enxertos promissores, alternativos ao limoeiro 'Cravo', nos Tabuleiros Costeiros de Sergipe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.2, p.132-141, 2016.

CASSIANI, G. et al. Soil-plant interaction monitoring: Small scale example of an apple orchard in Trentino, North-Eastern Italy. **Science of the Total Environment**, v. 543, p. 851–861, 2016.

CELANO, G. et al. Evaluation of soil water content in tilled and cover-cropped olive orchards by the geoelectrical technique. **Geoderma**, v. 163, p. 163–170, 2011.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L. Caracterização física de uma classe de solo do ecossistema do Tabuleiro Costeiro. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 367–378, 1998.

CINTRA, F. L. D.; LIBARDI, P. L.; JORGE, L. A. DE C. Distribuição do sistema radicular de porta-enxertos de citros em ecossistema de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 21, n. 3, p. 313–317, 1999.

CONSOLI, S. et al. Partial root-zone drying irrigation in orange orchards: Effects on water use and crop production characteristics. **European Journal of Agronomy**, v. 82, p. 190–202, 2017.

DICK, J. et al. Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. **Journal of Hydrology**, v. 559, p. 684–697, 2018.

FAO. **FAOSTAT**.

FERREIRA, J. N. et al. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna. **Oecologia**, v. 153, p. 417–430, 2007.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas e um pomar de laranjeira com sistemas de manejo da vegetação permanente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 637–645, 2007.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P. DA. Qualidade física do solo em pomar de laranja no noroeste do Paraná com manejo da cobertura permanente na entrelinha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 423–433, 2007.

GARCIA-MONTIEL, D. C. et al. Estimating seasonal changes in volumetric soil water content at landscape scales in a Savanna ecosystem using two-dimensional resistivity profiling. **Earth Interactions**, v. 12, n. 2, p. 1–25, 2008.

IBGE. Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. 2018.

IBGE. **Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil: Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>.

JAYAWICKREME, D. H.; DAM, R. L. VAN; HYNDMAN, D. W. Hydrological consequences of land-cover change: Quantifying the influence of plants on soil moisture with time-lapse electrical resistivity. **Geophysics**, v. 75, n. 4, p. 43–50, 2010.

JAYAWICKREME, D. H.; VAN DAM, R. L.; HYNDMAN, D. W. Subsurface imaging of vegetation, climate, and root-zone moisture interactions. **Geophysical Research Letters**, v. 35, p. 1–5, 2008.

JEŘÁBEK, J.; ZUMR, D.; DOSTÁL, T. Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, v. 174, n. August, p. 231–240, 2017.

KIHARA, J. et al. Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya. **Applied Soil Ecology**, v. 58, p. 12–20, 2012.

KOWALCZYK, S.; MAŚLAKOWSKI, M.; TUCHOLKA, P. Determination of the correlation between the electrical resistivity of non-cohesive soils and the degree of compaction. **Journal of Applied Geophysics**, v. 110, p. 43–50, 2014.

MA, Y.; VAN DAM, R. L.; JAYAWICKREME, D. H. Soil moisture variability in a temperate deciduous forest: insights from electrical resistivity and throughfall data. **Environmental Earth Sciences**, v. 72, p. 1367–1381, 2014.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 163–170, 2006.

MATTOS JUNIOR, D. et al. **Citros: principais informações e recomendações de cultivo** Boletim 200 Instituto Agrônomo de Campinas, , 2005.

MEDEIROS, J. C. et al. Deep subsoiling of a subsurface-compacted typical hapludult under citrus orchard. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 911–919, 2013.

MELLO, C. R. DE; SILVA, A. M. DA. **Hidrologia: Princípios e Aplicações em Sistemas Agrícolas**. 1. ed. Lavras: Editora UFLA, 2013.

MENEZES, M. D. DE et al. Spatial prediction of soil properties in two contrasting physiographic regions in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 3, p. 274–285, 2016.

MICHOT, D. et al. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. **Water Resources Research**, v. 39, n. 5, p. 1–20, 2003.

NEVES, C. S. V. J. et al. Root distribution of rootstocks for “Tahiti” lime. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 1, p. 94–99, 2004.

OLIVEIRA, L. F. C.; VIEIRA, D. B.; SOUZA, I. . Estudo do sistema radicular da tangerineira ‘Cleópatra’ com copa de laranjeira ‘Pêra’. **Laranja**, v. 19, p. 117–131, 1998.

PIKUL, J. L.; AASE, J. K. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 859–866, 2003.

PINTO, L. C. et al. Land-use effect on hydopedology in a mountainous region of Southeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 413–427, 2017.

PRANDO, M. B. et al. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 693–700, 2010.

QU, B. et al. Effect of various mulches on soil physico—Chemical properties and tree growth (*Sophora japonica*) in urban tree pits. **Plos One**, v. 14, n. 2, p. 1–12, 2019.

R CORE, T. **R: A language and environment for statistical computing** Viena, Áustria, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123–136, 2016.

ROBINSON, D. A. et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358–389, 2008.

ROCHA, O. C. et al. Chemical and hydrophysical attributes of an Oxisol under coffee intercropped with brachiaria in the Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1476–1483, 2016.

ROMERO-RUIZ, A. et al. A Review of Geophysical Methods for Soil Structure Characterization. **Reviews of Geophysics**, v. 56, p. 672–697, 2018.

ROMERO, P. et al. Interactive effects of the rootstock and the deficit irrigation technique on wine composition, nutraceutical potential, aromatic profile, and sensory attributes under semiarid and water limiting conditions. **Agricultural Water Management**, v. 225, n. November 2018, p. 105733, 2019.

SAMOUELIAN, A. et al. Electrical resistivity survey in soil science: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 83, p. 173–193, 2005.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SCHNEIDER, F. et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 193–204, 2017.

SEAPA. **Tangerina**. Disponível em:

<[http://www.reformaagraria.mg.gov.br/images/documentos/Perfil\\_tangerina\\_nov\\_2019\[1\].pdf](http://www.reformaagraria.mg.gov.br/images/documentos/Perfil_tangerina_nov_2019[1].pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2020.

SELADJI, S. et al. The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation. **European Journal of Soil Science**, v. 61, p. 1043–1055, 2010.

SILVA, B. M. et al. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 39, n. 1, p. 39–47, 2015.

SILVA, B. M. et al. Soil moisture associated with least limiting water range, leaf water potential, initial growth and yield of coffee as affected by soil management system. **Soil & Tillage Research**, v. 189, n. November 2018, p. 36–43, 2019.

SILVA, R. F. DA. **Comportamento físico-hídrico de solos submetidos ao preparo e manejo sob lavoura cafeeira**. 2018. 80 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SILVA, É. A. et al. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3894–3903, 2016.

SOARES FILHO, W. S.; CUNHA SOBRINHO, A. P. PASSOS, O. S. **Limoeiro 'Cravo Santa Cruz': variedade com maior número de sementes**. Embrapa Mandioca e Fruticultura - Fôlder / Folheto / Cartilha (INFOTECA-E), 2003.

SOUZA, L. D. et al. Avaliação de plantas cítricas, em diferentes profundidades de plantio, em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 2, p. 241–244, 2004.

SOUZA, L. DA S. et al. Distribuição do sistema radicular de citros em uma topossequência de solos de tabuleiro costeiro do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 503–513, 2008.

SRAYEDDIN, I.; DOUSSAN, C. Estimation of the spatial variability of root water uptake of maize and sorghum at the field scale by electrical resistivity tomography. **Plant and Soil**, v. 319, p. 185–207, 2009.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

VAN ES, H.; SCHINDELBECK, R. **Field Procedures and Data Analysis for the Cornell**

**Sprinkle Infiltrometer.** Ithaca: Department of Crop and Soil Sciences Research Series, 2003.

VANELLA, D. et al. Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 310–324, 2018.

WHALLEY, W. R. et al. Methods to estimate changes in soil water for phenotyping root activity in the field. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 407–422, 2017.

ZACCHEO, P. V. C. et al. Distribuição do sistema radicular de porta-enxertos sob laranjeira “Folha Murcha” em clima subtropical. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 921–930, 2012.

ZHU, J. J.; KANG, H. Z.; GONDA, Y. Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land. **Pedosphere**, v. 17, n. 6, p. 801–812, 2007.

## ARTIGO III

(Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003))

### **Porosidade drenável incorporada ao Intervalo Hídrico Ótimo para avaliação do impacto de manejo conservacionista em Argissolo**

**Resumo:** Devido a sua gênese, os Argissolos podem apresentar uma camada adensada que dificulta o crescimento de raízes e o processo de percolação de água no perfil do solo. Assim, o desenvolvimento de sistemas de manejo conservacionistas, que podem tornar esses ambientes mais sustentáveis do ponto de vista ambiental e mais produtivos sob a perspectiva agrícola torna-se fundamental. Dessa forma, nesse trabalho o conceito de porosidade drenável (PD), que permite compreender sobre o processo de recarga subterrânea, foi incorporada ao Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) a fim de elucidar impactos do manejo adotado nos aspectos agrícola – a partir da análise de água disponível para planta - e ambiental – por meio da PD. Objetivou-se com esse trabalho: (i) introduzir na estimativa do IHO o conceito de porosidade drenável como um dos limites superiores; (ii) avaliar a qualidade física do solo (QFS) por meio do IHO em um Argissolo que possui uma camada adensada e que foi submetido ao preparo profundo; (iii) verificar a influência do uso de diferentes porta-enxertos de citros na QFS e (iv) avaliar se as condições estruturais do solo – por meio da densidade do solo (Ds)- que limitam o crescimento vegetal são as mesmas que limitam o processo de recarga subterrânea. As avaliações foram realizadas em lavoura de citros instalada sob Argissolo submetido ao preparo profundo no município de Perdões, Minas Gerais. Os tratamentos constituíram-se de três porta-enxertos (Cravo Santa Cruz – CSC; Tangerineira “Sunki Tropical” – ST; e Citrandarin Índio – CI), e uma área de mata nativa próxima à lavoura foi considerada como referência para avaliação dos efeitos do manejo. A amostragem de solo para avaliação do IHO modificado foi realizada em duas camadas, 0-0,05 e 0,35-0,40 m, e duas posições no sulco de plantio, S: no tronco da planta e D: 0,5 m à direita do tronco. Para as condições estudadas o valor de densidade do solo crítica (Dsc), na qual o valor de IHO é nulo, foi igual a  $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ . A Ds que acarretou em limitações para o desenvolvimento da planta foi menor em relação àquela que limitou o processo de recarga de água, medido pela porosidade drenável. Dessa forma, o sistema de manejo avaliado possibilitou boa qualidade física ao desenvolvimento das plantas, uma vez que em nenhum caso amostrado, a Ds média ficou acima daquela considerada crítica. Contudo, dentro das condições experimentais e resultado obtidos não foi possível diferenciar os porta-enxertos quanto à melhoria na qualidade física do solo.

**Palavras-chave:** Preparo profundo. Estrutura do solo. Serviços ecossistêmicos. Recarga de água

## 1 INTRODUÇÃO

A citricultura apresenta grande importância econômica para o Brasil, sendo o país o segundo maior produtor de frutas cítricas do mundo (FAO, 2018; IBGE, 2018). Grande parte dos pomares citrícolas brasileiros estão instalados em áreas de Argissolo (MATTOS JUNIOR et al., 2005) - correspondente a Ultisol - que cobre 28% do território brasileiro, segunda de maior ocorrência no Brasil (IBGE, 2019). A principal característica desses solos é o acúmulo de argila em profundidade, originando um contraste textural entre o horizonte superficial e o horizonte B, que pode levar à formação de uma camada adensada que dificulta o crescimento das raízes das plantas, além de impedir ou diminuir a percolação de água no solo facilitando a formação de escoamento superficial e os consequentes processos erosivos (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006; SIMOES et al., 2009).

Na implantação de pomares citrícolas no Brasil predomina o uso do preparo convencional, com revolvimento até 0,20 m de profundidade em área total (FIDALSKI et al., 2009). No entanto, o preparo do solo até essa profundidade pode não romper camadas adensadas, uma vez que essas podem se encontrar em profundidades maiores que 0,20 m sendo limitantes ao crescimento do citros (SOUZA et al., 2004). Nesse sentido, o preparo profundo do solo se apresenta como potencial alternativa para contornar os problemas decorrentes do adensamento e viabilizar ou tornar a produção agrícolas nesses solos mais sustentáveis. Essa prática pode facilitar o desenvolvimento das raízes e promover melhorias em propriedades físicas, como aumento da porosidade total, diminuição da densidade do solo e da resistência à penetração o que consequentemente promoverá melhores condições de aeração, infiltração e distribuição de água no perfil do solo (BARBOSA et al., 2020; LIU et al., 2016; MEDEIROS et al., 2013; PIKUL; AASE, 2003; SCHNEIDER et al., 2017; SERAFIM et al., 2013a; SOUZA et al., 2004).

Assim, as práticas de manejo interferem na qualidade física do solo (QFS) e logo, nos serviços ecossistêmicos (BUSARI et al., 2015; VOGEL et al., 2018), e consequentemente na produção de frutas cítricas (AULER et al., 2008; FIDALSKI et al., 1999; NUÑEZ-MORENO; VALDEZ-GASCON, 1994), A QFS é um conceito complexo e que não pode ser medida diretamente, mas que pode ser inferida por indicadores, que são propriedades mensuráveis que tem sensibilidade às mudanças nas funções do solo e seus serviços ecossistêmicos associados (BÜNEMANN et al., 2018; CHERUBIN et al., 2016; RABOT et al., 2018). O solo desempenha diversos serviços ecossistêmicos, dentre os quais podemos destacar o suporte ao crescimento e

desenvolvimento das plantas, armazenamento, redistribuição e disponibilização de água e recarga subterrânea (ALVARENGA et al., 2012; PRADO et al., 2016).

Nesse contexto, a água disponível (AD) pode ser utilizada como indicador da QFS, e é definida como a faixa de umidade entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). No entanto, a AD pode não ser sensível suficiente para detectar mudanças devido à compactação do solo (ou seja, aumento da densidade do solo ( $D_s$ )), uma vez que a CC e o PMP tendem a aumentar de maneira semelhante com o aumento da  $D_s$ , fazendo com que a AD seja praticamente constante (REYNOLDS et al., 2008). Melhorando o conceito de AD, Silva et al. (1994) desenvolveram quantitativamente o conceito de Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) a partir da abordagem de faixa de água no solo não limitante apresentada por Letey (1985). O IHO foi definido como sendo a faixa de umidade no solo dentro da qual as limitações de crescimento de plantas associadas ao potencial hídrico, aeração e resistência mecânica são mínimas.

Essa abordagem vem sendo utilizada há alguns anos como indicadora de mudanças estruturais devido ao manejo do solo em diferentes situações (CHEN; WEIL; HILL, 2014; OLIVEIRA et al., 2019; GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013; MISHRA et al., 2015; SERAFIM et al., 2013b; SILVA et al., 2015; TORMENA et al., 2017). Avanços ao conceito do IHO têm sido propostas, por exemplo para prever degradação estrutural (IMHOFF et al., 2001), melhorar acurácia do diagnóstico do estresse hídrico e sua relação com produtividade (SILVA et al., 2015). Contudo, em revisão de literatura recente, o IHO tem sido apontado apenas como indicador da produção de biomassa (RABOT et al. 2018).

Outro importante serviço ecossistêmico do solo está relacionado à recarga de água subterrânea (BUNEMANN et al. 2018), e conseqüentemente o processo de abastecimento do lençol freático o que afeta diretamente ambientes subsequentes. Para a identificação de áreas com potencial para recarga deve-se utilizar atributos mais específicos, associados à infiltração de água no solo, tais como macroporosidade, condutividade hidráulica saturada (ALVARENGA et al., 2012) e porosidade drenável (MELLO et al., 2002). A porosidade drenável (PD) é definida como a fração da porosidade total na qual a água move-se livremente, equivalendo-se quantitativamente ao conteúdo de ar presente no solo na CC (BELTRAN, 1986; PIZARRO, 1978), ou seja, é o volume de poros drenáveis. Dessa maneira, para um mesmo solo, em áreas em que são observados maiores valores de  $D_s$  os valores de PD deverão ser menores (MENEZES et al., 2016), o que pode ser devido à redução da porosidade total (KUNCORO et al., 2014) e aumento da umidade na CC (REYNOLDS et al., 2008). Logo, como o uso e manejo do solo influenciam os valores de PD (MENEZES et al., 2016; PINTO et al., 2017) essa



propriedade apresenta grande importância dentro do contexto da busca por manejos cada vez mais sustentáveis.

Além do efeito da ação física do preparo do solo, é importante considerar também a influência dos sistemas radiculares das plantas na estruturação do solo (ALMEIDA et al., 2018; KIHARA et al., 2012; PRANDO et al., 2010; SILVA et al., 2016). Buscando aumentar a produção, bem como a qualidade do fruto produzido, os produtores de citros utilizam da técnica da enxertia. Nesse sentido, o desenvolvimento diferenciado de sistemas radiculares, como dos porta-exertos, pode acarretar diferentes condições de estrutura do solo, que serão favoráveis ou não à conservação do solo, produtividade das culturas e estabilização da disponibilidade de água. Dentre os diferentes porta-enxertos utilizados, destaca-se o uso do limoeiro 'Cravo Santa Cruz', que é uma seleção de limoeiro 'Cravo' e por isso apresenta grande rusticidade e adaptação a diferentes condições de clima e solo (SOARES FILHO; CUNHA SOBRINHO; PASSOS, 2003). O porta-enxerto tangerineira 'Sunki' (*Citrus sunki* (Hayata) Hort. ex Tanaka), originária da China, está entre os principais porta-enxertos cítricos comerciais. Confere à copa elevado vigor, boa produtividade de frutos, além de ser tolerante a doenças, como tristeza, à seca, o que proporciona maturação tardia dos frutos. O 'Citrandarin Índio' é um híbrido proveniente do cruzamento entre a tangerina 'Sunki', *Citrus sunki* (Hayata) hort. ex Tanaka versus *Poncirus trifoliata* (L.), vem sendo considerado muito promissor principalmente por promover maior eficiência produtiva (CARVALHO et al., 2016) e reduzir o porte das plantas (BASTOS et al., 2014).

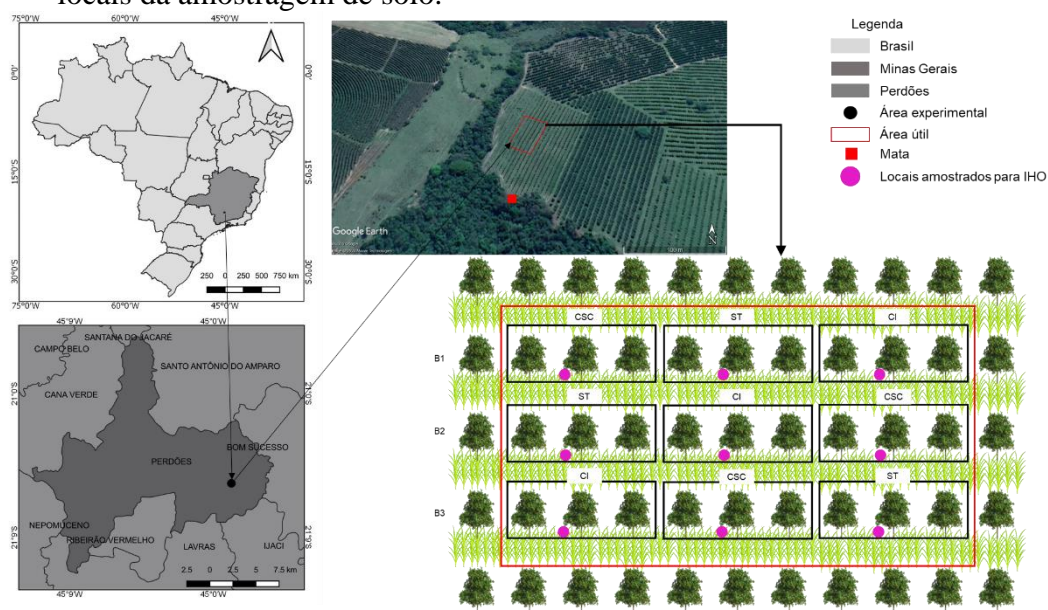
Diante do exposto, sugere-se com esse trabalho incorporar a PD ao IHO a fim de fornecer informações mais robustas sobre os aspectos agrícola e ambiental do manejo adotado. Assim, as hipóteses testadas são: (i) o manejo adotado para o cultivo de citros em Argissolo abranda as limitações decorrentes da camada adensada, aumentando a QFS para o crescimento das plantas e, contribui para aumento da água disponível e recarga subterrânea e (ii) os três porta-enxertos utilizados possuem crescimento radicular diferenciados, que poderá promover distintos padrões de alteração da porosidade do solo, com consequências na QFS. Portanto, objetivou-se com esse trabalho: (i) introduzir na estimativa do IHO o parâmetro porosidade drenável como um dos limites superiores; (ii) avaliar a QFS por meio do IHO em um Argissolo que possui uma camada adensada e que foi submetido ao preparo profundo (iii) verificar a influência do uso de diferentes porta-enxertos de citros na QFS e (iv) avaliar se as condições estruturais do solo (por meio do parâmetro  $D_s$ ) que limitam o crescimento vegetal são as mesmas que limitam o processo de recarga subterrânea.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Descrição da área experimental

A área experimental está localizada em um pomar de citros no município de Perdões, microrregião Campo das Vertentes em Minas Gerais, com coordenadas geográficas 21°05'36"S e 44°58'52"O (Datum WGS84) e altitude de 890 m (FIGURA 1). O experimento instalado em área de 550 m<sup>2</sup> (22 por 25 m) foi montado no terço inferior de encosta com declividade máxima de 13%, e face de exposição para sudoeste. Segundo classificação de Köppen o clima da região é Cwb com invernos frios e secos e verões quentes e chuvosos, com temperatura média de 19° C e pluviosidade anual de 1669 mm (ALVARES et al., 2014).

Figura 1 - Localização da área experimental, croqui do delineamento experimental adotado e locais da amostragem de solo.



Fonte: Do autor (2020)

O histórico de uso da área foi como pastagem entre 2000 e 2005, como lavoura de milho entre 2006 a 2007 e no período de 2007 a 2013 foi utilizada para produção de maracujá. Para a instalação da cultura do citros foi realizada correção da acidez em área total antes da abertura dos sulcos com aplicação de 2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, sem incorporação ao solo. O preparo do solo, realizado em novembro de 2014 pelo produtor, consistiu na abertura do sulco com sulcador de uma haste com largura de trabalho de 1,0 m e profundidade efetiva de preparo de 0,50 m e subsolagem profunda realizada duas vezes com um subsolador de três hastas com largura de trabalho de 1,0 m e profundidade de preparo de 0,50 m. Após, foi utilizada grade

niveladora sobre o sulco para acertar o terreno e elevar um pouco o leito de plantio. A adubação do sulco de plantio consistiu na aplicação de 400 g m<sup>-1</sup> de superfosfato simples e calcário de forma manual e em todos os anos após o plantio são realizadas adubações de cobertura também de forma manual.

## 2.1 Caracterização do solo da área experimental

O solo sob o qual o experimento está instalado foi classificado como Argissolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa (SANTOS et al., 2018), correspondente a Hapludult (SOIL SURVEY STAFF, 2014). A textura do solo no horizonte A é composta por 37% de argila, 16% de silte e 47% de areia e horizonte Bt por 38% de argila, 13 % de silte e 49% de areia. Apesar da ausência de gradiente textural, a classificação do solo se deu por outras características identificadas durante a caracterização morfológica do perfil do solo, como cerosidade, estrutura e diferenças, entre o horizonte A e B, quanto a dificuldade da entrada da faca.

Para a caracterização química do solo, em abril de 2018 foram coletadas amostras de solo para análises de fertilidade. A amostragem foi realizada nas camadas 0-0,05 m e 0,35-0,40 m no sulco de plantio de cada tratamento e na área de vegetação nativa próxima, fragmento de mata atlântica com Floresta Sazonal Semidecidual sob mesmo solo da área experimental. A caracterização química do solo, para cada camada e tratamento avaliado, é apresentada na Tabela .

Tabela 1 - Caracterização química do solo nas camadas 0-0,05 m e 0,35-0,40 m para cada tratamento (porta-enxerto) e na área de mata.

Trat.	Camada m	pH H <sub>2</sub> O	K <sup>+</sup> -- mg dm <sup>-3</sup> --	P	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	T	V	M.O.
					----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				%	dag kg <sup>-1</sup>
<b>Mata</b>	0-0,05	6,10	151,68	2,78	4,43	1,72	0,06	10,12	64,61	3,64
	0,35-0,40	5,00	74,27	1,06	0,78	0,26	0,74	6,45	19,08	1,81
<b>CSC</b>	0-0,05	6,30	241,86	167,77	5,95	1,39	0,03	9,73	81,56	2,60
	0,35-0,40	5,37	42,68	2,54	2,28	0,64	0,11	5,51	54,54	1,07
<b>ST</b>	0-0,05	7,17	232,33	21,40	4,99	1,34	0,04	8,25	84,01	2,50
	0,35-0,40	5,67	50,52	3,76	2,27	0,68	0,14	5,43	56,11	1,29
<b>CI</b>	0-0,05	6,30	216,93	404,60	7,35	1,05	0,03	10,81	82,87	2,32
	0,35-0,40	6,27	62,45	9,13	2,91	0,58	0,07	5,44	64,32	1,01

CSC: Cravo Santa Cruz; ST: Sunki Tropical; CI: Cintrandin Índio; pH em água: relação de 1:2,5 (solo: água); M.O. - Matéria Orgânica do Solo - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10N; P e K: Extrator Mehlich-1; Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>: Extrator: KCl - 1 mol/L; T - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V%: Índice de Saturação de Bases

Fonte: Do autor (2020)

### 2.3 Delineamento experimental

Em dezembro de 2014 foi realizado o plantio das mudas que foram dispostas em um espaçamento de 2,5 m entre plantas e 5,5 m entre linhas. Cabe destacar que as mudas utilizadas nesse experimento foram cedidas pela Embrapa Mandioca e Fruticultura. Na área foram plantados cinco tipos de porta-enxerto sob três copas, ou seja, 15 tratamentos em três repetições dispostas em blocos ao acaso. No entanto, a partir desse experimento maior são estudados nesse trabalho três porta-enxertos todos sob copa de tangerina 'Poncã' (*Citrus reticulata*. Blanco). Dessa maneira, os tratamentos são os porta-enxertos: Citrandarin Índio (*Citrus sunki* (Hayata) Hort. ex Tanaka) x Trifoliata (*Poncirus trifoliata* (L.)) – CI; tangerineira “Sunki Tropical” (*Citrus sunki* (Hayata) Hort. ex Tanaka) – ST; e Cravo Santa Cruz (*Citrus Limonia* Osbeck) - CSC. A escolha desses se deu por questões mercadológicas levantadas pelo produtor, além de rusticidade diferenciada entre os porta-enxertos. As parcelas experimentais de cada tratamento foram dispostas em três blocos e são constituídas por três plantas. Salienta-se que em consórcio com o citros realizou-se o plantio da gramínea *Brachiaria decumbens* (Syn. Urochloa), que é roçada periodicamente e incorporada na linha de plantio. A condição de referência desse estudo é uma área de vegetação secundária com mata atlântica que se encontra próxima às parcelas experimentais, que se encontra próxima às parcelas experimentais.

### 2.4 Amostragem de solo

A amostragem para a determinação do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) foi realizada em outubro de 2018, cerca de quatro anos após a implantação do experimento. Foram coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos de 0,63 m de diâmetro e 0,025 m de altura na segunda planta de cada parcela experimental (FIGURA 1) nas camadas 0-0,05 m e 0,35-0,40 m e em duas posições no sulco de plantio, S: próximo do tronco da planta e D: 0,5 m à direita do tronco. Ainda, amostras foram coletadas na área de mata secundária (M) nas mesmas camadas e em três repetições.

Dessa maneira foram coletadas no total 294 amostras ((3 porta-enxertos x 2 posições x 2 camadas x 3 blocos x 7 anéis) + (1 mata x 2 camadas x 3 repetições x 7 anéis)) em 14 situações amostrais: CSC S 0-0,05; CSC D 0-0,05; CSC S 0,35-0,40; CSC D 0,35-0,40; ST S 0-0,05; ST D 0-0,05; ST S 0,35-0,40; ST D 0,35-0,40; CI S 0-0,05; CI D 0-0,05; CI S 0,35-0,40; CI D 0,35-0,40; M 0-0,05 e M 0,35-0,40. Destaca-se que foram coletados sete anéis em cada situação, sendo um para cada tensão matricial.

## 2.5 Determinação do IHO

Os anéis coletados foram divididos em sete grupos, que correspondem às tensões matriciais às quais as amostras foram submetidas: 4, 6, 10 e 33 kPa obtidas na mesa de tensão e 100, 500 e 1500 obtidas em placas porosas no extrator de Richards (KLUTE, 1986). Após atingir o equilíbrio em cada tensão as amostras foram pesadas e, em seguida, determinada a resistência a penetração (RP) utilizando um penetrógrafo digital de bancada marca Marconi, modelo MA 933, ponteira tipo cone circular reto de 45° e 3,75 mm de diâmetro sob velocidade constante de 10 mm min<sup>-1</sup> (SILVA et al., 2015). Em seguida, foram secas em estufa a 105-110°C por um período de 24 h para determinação da densidade do solo (Ds). A umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), após equilíbrio em cada potencial, foi obtida pela relação  $\theta = U(Ds/Da)$ , onde  $\theta$ : umidade volumétrica (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>); U: umidade gravimétrica (kg kg<sup>-1</sup>); Ds: densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); Da: densidade da água (considerada como 1 g cm<sup>-3</sup>).

Para determinação IHO, modelos não lineares foram ajustados para curva de retenção de água (CRA) (equação 1) e curva de resistência a penetração (CRP) (equação 2) em função da densidade do solo, conforme descrito por Silva et al. (2015).

$$\theta = a\psi^b Ds^c \quad (1)$$

$$RP = d\theta^e Ds^f \quad (2)$$

onde  $\theta$ : conteúdo de água no solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $\Psi$ : tensão matricial (kPa); Ds: densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); RP: resistência a penetração (MPa); a, b, c, d, e, f são coeficientes obtidos no ajuste dos dados.

Considerou-se como limite superior do IHO o menor valor de  $\theta$  entre o conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) – estimado após equilíbrio na tensão de 10kPa – e o conteúdo de água do solo que garante porosidade de aeração de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, calculado pela expressão 3.

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) - 0,10 \quad (3)$$

Como limite inferior foi considerado o maior valor de  $\theta$  entre o conteúdo de água no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) – estimado após equilíbrio na tensão de 1500 kPa – ou o conteúdo de água em que a RP assume valor crítico de 2,2 MPa ( $\theta_{RP}$ ) (ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995)..

## 2.6 Inclusão da porosidade drenável no IHO

O IHO no seu modelo original (SILVA; KAY; PERFECT, 1994) permite avaliar como os manejos adotados podem limitar o crescimento das plantas, avaliando, dessa maneira, o aspecto agrícola. No entanto, apesar de ser usado como uma ferramenta para avaliação da QFS, o uso do IHO está relacionado apenas à função de suprimento de água e ar para a planta e suporte ao crescimento radicular. Com o intuito de avaliar como o manejo interfere na recarga de água para o subsolo, outro importante serviço ecossistêmico do solo, sugeriu-se a incorporação da PD no IHO, o que permitirá avaliar melhor o aspecto ambiental do manejo adotado.

A porosidade drenável pode ser calculada pela equação 4 (MELLO et al., 2002).

$$PD = \theta_s - \theta_{cc} \quad (4)$$

onde PD é a porosidade drenável ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_s$  é a umidade na saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_{cc}$  é a umidade na capacidade de campo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

Para o cálculo da variação da PD com a Ds, considerou-se  $\theta_s$  equivalente à porosidade total do solo (PT). Primeiramente calculou-se como a PT varia com a Ds (equação 5), em seguida a PD foi calculada como a diferença entre a  $\theta_{PT}$  e a  $\theta_{CC}$  para cada valor de Ds, conforme equação 6.

$$\theta_{PT} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) \quad (5)$$

$$\theta_{PD} = \left(1 - \frac{Ds}{Dp}\right) - \theta_{CC} \quad (6)$$

## 2.7 Análises estatísticas

Foi realizada a estatística descritiva para todo o banco de dados experimental para Ds. Os coeficientes dos modelos (*a, b, c, d, e, f*) foram obtidos por meio da minimização do quadrado dos erros (LEAO; SILVA, 2004) utilizando o pacote nls (BATY et al., 2015) no software R (R STUDIO TEAM, 2018). A precisão dos modelos foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela raiz do erro médio quadrático (RMSE) entre os valores determinados e estimados. O intervalo de confiança (95%) para a Ds média em cada tratamento e os gráficos foram plotados usando o SigmaPlot 11.0.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Estatística descritiva densidade do solo e resistência a penetração

Na Tabela 2 é apresentada a estatística descritiva dos dados de Ds e RP em cada situação de amostragem. As diferentes combinações de porta-enxertos, posição e profundidade forneceram uma grande variação para Ds (0,88-1,51 g cm<sup>-3</sup>), o que foi ainda maior para RP (0,10-5,46 MPa) (TABELA 2). Os altos coeficientes de variação (CV) para RP podem ser explicados pela alta variabilidade espacial e sobretudo alta influência da umidade do solo nessa propriedade (SILVA et al., 2015).

A situação que apresentou menor Ds média (0,97 g cm<sup>-3</sup>) foi na área de mata (M) na camada 0-0,5 m., no entanto, a RP média foi menor na situação ST S 0-0,05 m, o que indica que o manejo adotado aliviou as limitações mecânicas impostas pela presença da camada adensada, permitindo assim maior crescimento radicular. Por outro lado, a maior Ds média (1,37 g cm<sup>-3</sup>) e RP média (1,84 MPa) foram encontradas para o porta-enxerto Cravo Santa Cruz (CSC) na D e camada 0,35-0,40 m, o que é devido à presença da camada adensada próximo a profundidade de 0,35 m, verificada em campo e que é típica da classe dos Argissolos (LIMA et al., 2009; MARCOLAN; ANGHINONI, 2006), e apesar do sulco ter sido subsolado a haste subsoladora não ter atingido a D nessa camada, como também foi verificado em campo. Além disso, a tendência é que ao longo do tempo após as operações de preparo, a estrutura do solo retorne às condições do estado original devido principalmente aos ciclos de umedecimento e secagem do solo (BAMBERG et al., 2011; REICHERT et al., 2009a).

Dentro de todo o conjunto de dados o menor valor de Ds (0,88 g cm<sup>-3</sup>) foi observado na camada superficial da área de mata, o que é devido à grande presença de raízes e maior teor de matéria orgânica nessa área (TABELA 1) (MINASNY; MCBRATNEY, 2018). No entanto, a menor RP (0,10 MPa) foi observada para ST S 0,35-0,40, que ocorreu devido ao alívio estrutural promovido pelo preparo do solo que melhorou a qualidade do solo (REICHERT et al., 2016; SCHNEIDER et al., 2017). Já o maior valor de Ds (1,51 g cm<sup>-3</sup>) e RP (5,46 MPa) foram verificados para CSC na D na camada 0,35-0,40 m, seguindo a tendência dos valores médios obtidos para essas propriedades.





e resistência à penetração, respectivamente (TABELA 3). O modelo CRA mostrou menor RMSE ( $0,026 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) que o modelo CRP (RMSE= $0,560 \text{ MPa}$ ). Ao utilizar todo o conjunto de dados de todos os manejos observa-se um incremento do IHO (área colorida em verde) com o aumento da  $D_s$  até o valor de  $1,29 \text{ g cm}^{-3}$ , e a partir desse observa-se uma redução do conteúdo de água (FIGURAS 2 e 3).

Tabela 3 - Coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  da curva de retenção de água (CRA),  $d$ ,  $e$  e  $f$  da curva de resistência à penetração (CRP), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) do modelo de IHO geral. N=294

	Coeficientes empíricos			$R^2$	RMSE
	$a$	$b$	$c$		
CRA	0,274	-0,071	1,083	0,79	$0,026 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$
	$d$	$e$	$f$		
CRP	0,004	-2,558	9,278	0,625	$0,560 \text{ MPa}$

Fonte: Do autor (2020)

Dessa maneira, aumentos na  $D_s$  tendem a diminuir o IHO até o valor nulo, e a  $D_s$  que isso ocorre é chamada de densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ). Para as condições estudadas esse valor é de  $1,42 \text{ g cm}^{-3}$  (FIGURAS 2 e 3), o que é menor do que os valores relatados na literatura para Argissolos, indicando condição mais restritiva às plantas. Fidalski et al. (2010) trabalhando em Argissolo Vermelho distrófico latossólico de textura franco arenosa cultivado com citros observaram que o IHO decresce com o aumento da  $D_s$  e atinge valor igual a zero em densidades maiores que  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ . Collares et al. (2006) também avaliaram o IHO em Argissolo Vermelho distrófico de textura franco arenosa cultivado com feijão e observaram que a  $D_{sc}$  foi de  $1,75 \text{ g cm}^{-3}$  e León et al. (2019) encontraram valores de  $D_{sc}$  superiores a  $1,80 \text{ g cm}^{-3}$  para Argissolo cultivado com cana-de-açúcar.

Por outro lado, a densidade crítica é variável em função da textura do solo (REICHERT et al., 2009b; SEVERIANO et al., 2011). Nesse sentido, Calonego e Rosolem (2011) trabalhando em um Nitossolo Vermelho de textura argilosa verificaram que na camada 0-0,20 m os valores de  $D_{sc}$  variaram de  $1,31$  a  $1,37 \text{ g cm}^{-3}$  após três anos de uso de plantas de cobertura em sistema de semeadura direta. Contudo, ao analisar as Figuras 2 e 3 pode-se verificar que em todas as situações amostradas a  $D_s$  média do solo está abaixo da  $D_{sc}$ , indicando que apesar do manejo adotado aumentar a  $D_s$ , os valores atingidos não correspondem a condições consideradas críticas para o desenvolvimento da planta.

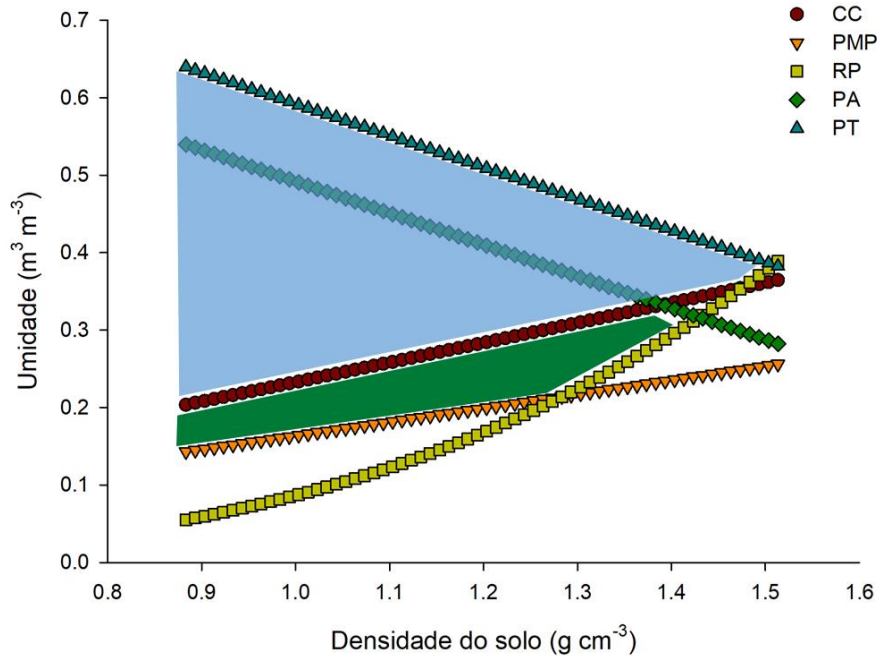
Os modelos mostraram comportamentos típicos, sendo observado um efeito positivo da  $D_s$  na retenção de água nas tensões de  $10 \text{ kPa}$  ( $\theta_{CC}$ ),  $1500 \text{ kPa}$  ( $\theta_{PMP}$ ) e  $\theta_{RP}$  (SILVA et al., 2015,

2011). A compactação do solo, com conseqüente aumento da densidade, promove a redistribuição da porosidade com redução da macroporosidade e aumento da microporosidade do solo (COLLARES et al., 2006; REICHERT et al., 2009b), aumentando a água disponível para a planta ( $AD = \theta_{CC} - \theta_{PMP}$ ). Assim, apesar da condição de mata apresentar menor  $D_s$ , nas demais situações há maior quantidade de água disponível para a planta, exceto para CSC D 0,35-0,40 e CI D 0,35-0,40 (FIGURAS 2 e 3).

Em muitos trabalhos que utilizaram o IHO para avaliar efeitos do uso e manejo na qualidade física do solo, foi observado um incremento na AD com o aumento da  $D_s$  (GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013; LIMA et al., 2012; SILVA et al., 2011). No entanto, esse aumento do conteúdo de água disponível varia com o tipo e a textura do solo trabalhado, uma vez que esses fatores influenciam na retenção de água do solo (REYNOLDS, 2018; SAFADOUST et al., 2014). Nesse sentido, o incremento no conteúdo de água com o aumento da  $D_s$  verificado por Silva et al. (2015) trabalhando em Latossolo oxídico de textura muito argilosa foi cerca de duas vezes maior do que o observado no presente trabalho. Esse resultado pode ser explicado pela distribuição de poros característica de Latossolos (CARDUCCI et al., 2011) que proporcionam baixa quantidade de AD, assim, algum grau de compactação do solo será benéfico nesses solos (SEVERIANO et al., 2011). Por outro lado, Safadoust et al. (2014) observaram que a  $D_s$  não exibiu efeito significativo sobre a AD em solo argiloso, mas houve aumento da  $\theta_{CC}$  e da  $\theta_{PMP}$  com incremento da  $D_s$  para solo arenoso, ambos localizados na região oeste do Irã.

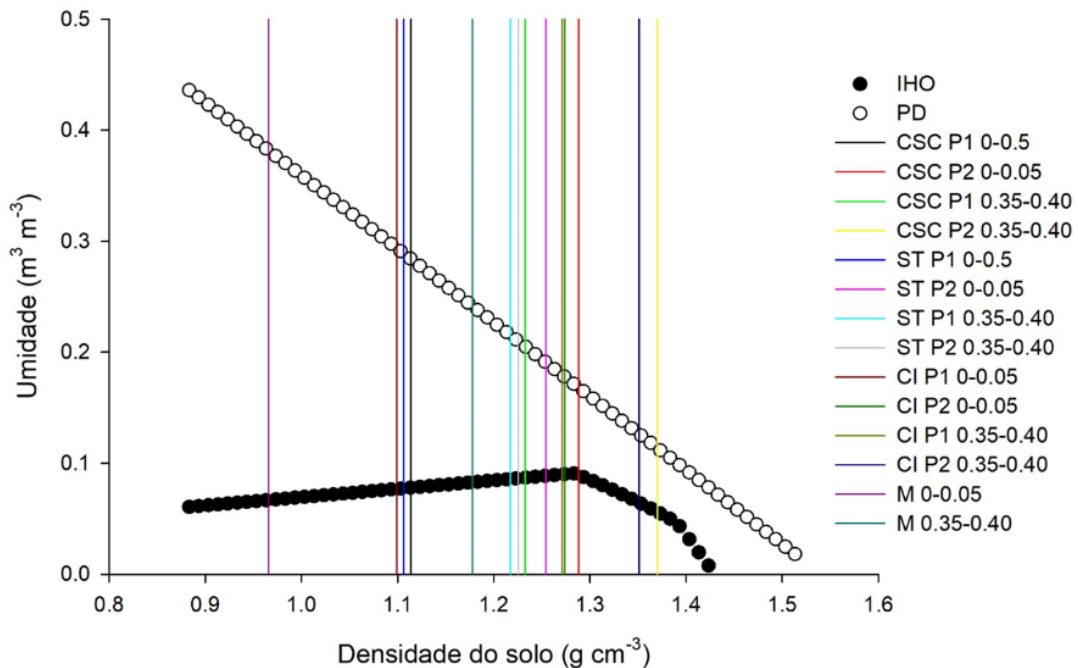
As Figuras 2 e 3 também mostram a redução da porosidade drenável (área colorida em azul e círculos brancos) com o aumento da  $D_s$ , o que é explicado pela redução dos macroporos com a compactação do solo. Essa classe de poros é a responsável pela drenagem da água no solo (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999; LIMA et al., 2012), e dessa maneira é fundamental para o processo de infiltração, reabastecimento de água subterrânea e redução da erosão (HAMZA; ANDERSON, 2005). Assim, ainda que a compactação promova um aumento no IHO até certo valor de  $D_s$ , a redução da PD que ocorreu não foi compensada (FIGURA 3). No entanto, a  $D_s$  que condiciona valor nulo para PD ( $1,53 \text{ g cm}^{-3}$ ) é maior que a  $D_{sc}$  ( $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ ), indicando que a condição de compactação do solo que restringe o crescimento e rendimento das culturas, não é a mesma que afeta as propriedades hidrológicas do solo.

Figura 2 - Modelagem da variação da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (PA), resistência à penetração do solo de  $2,2 \text{ MPa}$  (RP) e porosidade total (PT), em função da densidade do solo ( $D_s$ ) e usando todas as amostras coletadas. A área colorida em azul e verde indicam a variação da porosidade drenável (PD) e do intervalo hídrico ótimo (IHO) com a  $D_s$ , respectivamente.  $N= 294$ .



Fonte: Do autor (2020)

Figura 3 - Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) e da porosidade drenável (PD) em função da densidade do solo. As linhas verticais coloridas indicam a  $D_s$  média de cada situação amostrada.  $N= 294$ .



Fonte: Do autor (2020)

Além disso, foi observado que para  $\theta_{PA}$  ocorreu redução progressiva com o aumento da densidade do solo (SILVA et al., 2015, 2011), mas essa passou a substituir a  $\theta_{CC}$  apenas no final do IHO, quando a  $D_s$  é maior que  $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ . Esse resultado corrobora com o que foi verificado em muitos trabalhos, os quais relatam que a aeração do solo é menos limitante que a capacidade de campo, uma vez que a  $\theta_{PA}$  é na maioria das vezes maior que a  $\theta_{CC}$ , o que indica boa qualidade estrutural (GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013; SILVA et al., 2015, 2011). De qualquer forma, em todas as situações avaliadas o solo apresentou valores de  $D_s$  abaixo de  $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ , o que indica que a aeração não é um fator limitante para o crescimento das plantas.

Em relação à RP foi adotado o valor de 2,2 MPa considerado crítico para o crescimento radicular da cultura de citros (ABERCROMBIE; PLESSIS, 1995). Foi possível verificar que à medida que a  $D_s$  aumenta a  $\theta_{RP}$  também aumenta, indicando perda da QFS, uma vez que esse resultado reflete em condições físicas menos favoráveis para o crescimento das plantas, por proporcionar restrição mecânica a essas mesmo em condições em que não há restrição hídrica (GUIMARÃES et al., 2013). O valor de  $D_s$  em que  $\theta_{RP}$  passa a ser o limite inferior do IHO é  $1,29 \text{ g cm}^{-3}$ , e duas situações (CSC D 0,35-0,40 e CI D 0,35-0,40) mostraram valor de  $D_s$  maior, evidenciando que nessas áreas a umidade do solo deve ser mantida elevada para evitar o comprometimento do crescimento radicular (OLIBONE; ENCIDE-OLIBONE; ROSOLEM, 2010).

### 3.3 Intervalo Hídrico Ótimo para cada situação avaliada

As equações que relacionam o conteúdo de água na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e conteúdo de água correspondente à resistência à penetração de 2,2 MPa no solo ( $\theta_{RP}$ ) com a densidade do solo são mostradas na Tabela . As Figuras 4 e 5 mostram a variação do IHO (área colorida de verde) e da PD (área colorida de azul) nas camadas 0-0,05 e 0,35-0,40 m, respectivamente, para cada situação amostrada.

Baseados nos modelos obtidos (TABELA 4) observou-se que de maneira geral houve um incremento no IHO com o aumento da  $D_s$  (FIGURA 4 a 7), o que não ocorreu apenas para a situação CI D 0,35-0,40 (FIGURA 5 e 7). Na camada 0-0,05 m apenas a situação CI D atingiu a  $D_{sc}$  ( $1,44 \text{ g cm}^{-3}$ ). Na camada 0,35-0,40 m apenas ST S, CI S e M não atingiram a  $D_{sc}$ . Para as demais situações os valores de  $D_{sc}$  foram  $1,41 \text{ g cm}^{-3}$  para CSC S, CSC D, ST D e  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  para CI D 0,35-0,40 m, respectivamente. Quanto maior a  $D_{sc}$  menor a probabilidade de a planta permanecer sob condições de estresse (PRADO et al., 2018). Logo nas situações que  $D_{sc}$  não foi atingida a QFS é maior, indicando que o manejo pode ser benéfico para esse solo, e que

os porta-enxertos ST e CI proporcionaram condições de estrutura diferente do CSC. No entanto, em nenhuma situação a  $D_s$  média do solo atingiu a  $D_{sc}$ , mesmo ao considerar os limites do intervalo de confiança (FIGURAS 4 e 5).

Tabela 4 - Equações não lineares da variação do teor de água ( $\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) com a densidade do solo ( $D_s = \text{g cm}^{-3}$ ) para amostras de solo com capacidade de campo (CC:  $\psi=10 \text{ kPa}$ ), ponto de murcha permanente (PMP:  $\psi=1500 \text{ kPa}$ ) e conteúdo de água correspondente à resistência à penetração no solo (RP) de 2,2 MPa usadas na determinação do IHO, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) para cada situação de amostragem. Para cada situação amostrada tem-se um conjunto amostral igual a 21.

Situação de amostragem	CRA	$R^2$	RMSE ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )	CRP	$R^2$	RMSE (MPa)
CSC S 0-0,05	$\theta=0,262\psi^{-0,067}D_s^{0,944}$	0,84	0,0140	$\theta=(2,2/(0,0000065D_s^{12,83}))^{1/-6,320}$	0,89	0,318
CSC D 0-0,05	$\theta=0,289\psi^{-0,072}D_s^{0,823}$	0,95	0,0119	$\theta=(2,2/(0,0014D_s^{8,531}))^{1/-3,523}$	0,80	0,495
CSC S 0,35-0,40	$\theta=0,308\psi^{-0,056}D_s^{0,829}$	0,91	0,0156	$\theta=(2,2/(0,000039D_s^{11,91}))^{1/-5,930}$	0,93	0,341
CSC D 0,35-0,40	$\theta=0,264\psi^{-0,063}D_s^{1,283}$	0,95	0,0107	$\theta=(2,2/(0,0011D_s^{10,697}))^{1/-3,286}$	0,77	0,651
ST S 0-0,05	$\theta=0,257\psi^{-0,079}D_s^{0,789}$	0,94	0,0095	$\theta=(2,2/(0,0060D_s^{3,603}))^{1/-2,219}$	0,26	0,200
ST D 0-0,05	$\theta=0,296\psi^{-0,088}D_s^{0,818}$	0,94	0,0130	$\theta=(2,2/(0,0039D_s^{6,840}))^{1/-2,933}$	0,78	0,331
ST S 0,35-0,40	$\theta=0,265\psi^{-0,074}D_s^{1,220}$	0,75	0,0267	$\theta=(2,2/(0,013D_s^{6,414}))^{1/-2,118}$	0,65	0,436
ST D 0,35-0,40	$\theta=0,266\psi^{-0,089}D_s^{1,280}$	0,83	0,0220	$\theta=(2,2/(0,0000061D_s^{19,94}))^{1/-4,886}$	0,76	0,410
CI S 0-0,05	$\theta=0,265\psi^{-0,071}D_s^{0,957}$	0,91	0,0124	$\theta=(2,2/(0,0000008D_s^{17,04}))^{1/-7,186}$	0,85	0,278
CI D 0-0,05	$\theta=0,283\psi^{-0,074}D_s^{1,054}$	0,92	0,0146	$\theta=(2,2/(0,0021D_s^{8,765}))^{1/-3,196}$	0,71	0,435
CI S 0,35-0,40	$\theta=0,293\psi^{-0,061}D_s^{0,908}$	0,77	0,0266	$\theta=(2,2/(0,0083D_s^{7,491}))^{1/-2,300}$	0,55	0,410
CI D 0,35-0,40	$\theta=0,308\psi^{-0,060}D_s^{0,720}$	0,70	0,0269	$\theta=(2,2/(0,020D_s^{3,579}))^{1/-2,720}$	0,36	0,641
M 0-0,05	$\theta=0,315\psi^{-0,073}D_s^{0,447}$	0,86	0,0141	$\theta=(2,2/(0,0080D_s^{6,804}))^{1/-2,741}$	0,89	0,318
M 0,35-0,40	$\theta=0,274\psi^{-0,090}D_s^{0,694}$	0,84	0,014	$\theta=(2,2/(0,0050D_s^{5,396}))^{1/-2,625}$	0,67	0,235

Fonte: Do autor (2020)

De maneira geral, observou-se que os valores de  $\theta_{PA}$  se encontraram acima da  $\theta_{CC}$  para a maioria das situações avaliadas. O valor de  $D_s$  em que a CC é substituída pela PA foi maior que  $1,37 \text{ g cm}^{-3}$  em todos os casos, o que é próximo dos valores observados para  $D_{sc}$ . Esses resultados corroboram com os encontrados em diversos trabalhos que avaliaram o IHO em diferentes solos e usos, e verificaram que a aeração do solo não foi o limitante superior, inclusive em valores de  $D_s$  maiores (BORTOLANZA; KLEIN, 2016; CECAGNO et al., 2016; FIDALSKI; TORMENA; ALVES, 2013; GUEDES FILHO; BLANCO-CANQUI; SILVA, 2013; SERAFIM et al., 2013b). Contudo, dentre as situações apenas duas, CSC D e CI D ambas

na camada 0,35-0,40 m, apresentaram intervalo de confiança da  $D_s$  acima do valor em que  $\theta_{PA}$  substituiu  $\theta_{CC}$  (FIGURA 5), indicando que mesmo que o solo apresente condições hídricas favoráveis ao desenvolvimento da planta a aeração será um limitante.

Em relação aos limites inferiores do IHO, observou-se que apenas nas situações ST S e M na camada 0-0,05 m a RP não substituiu o PMP (FIGURA 4), o que indica maior QFS nesses casos. Nas demais, os valores de  $D_s$  em que a RP torna-se o limitante inferior variaram de 1,15 g cm<sup>-3</sup> para CI S 0-0,05 a 1,38 g cm<sup>-3</sup> para CI S 0,35-0,40 (FIGURAS 4 e 5). Ainda, cabe ressaltar que em CI D 0,35-0,40 a RP foi o limitante inferior em todo o IHO (FIGURA 5), o que associado às demais observações evidencia a menor QFS nessa área. Logo nessas situações aonde a RP é o limitante inferior, é necessário que o solo tenha maior conteúdo de água para manter a RP abaixo do seu limite crítico (TORMENA et al., 2017), pois o acréscimo no conteúdo de água do solo reduz a fricção ou coesão entre as partículas do solo ocasionada pela compactação (TORMENA et al., 2007).

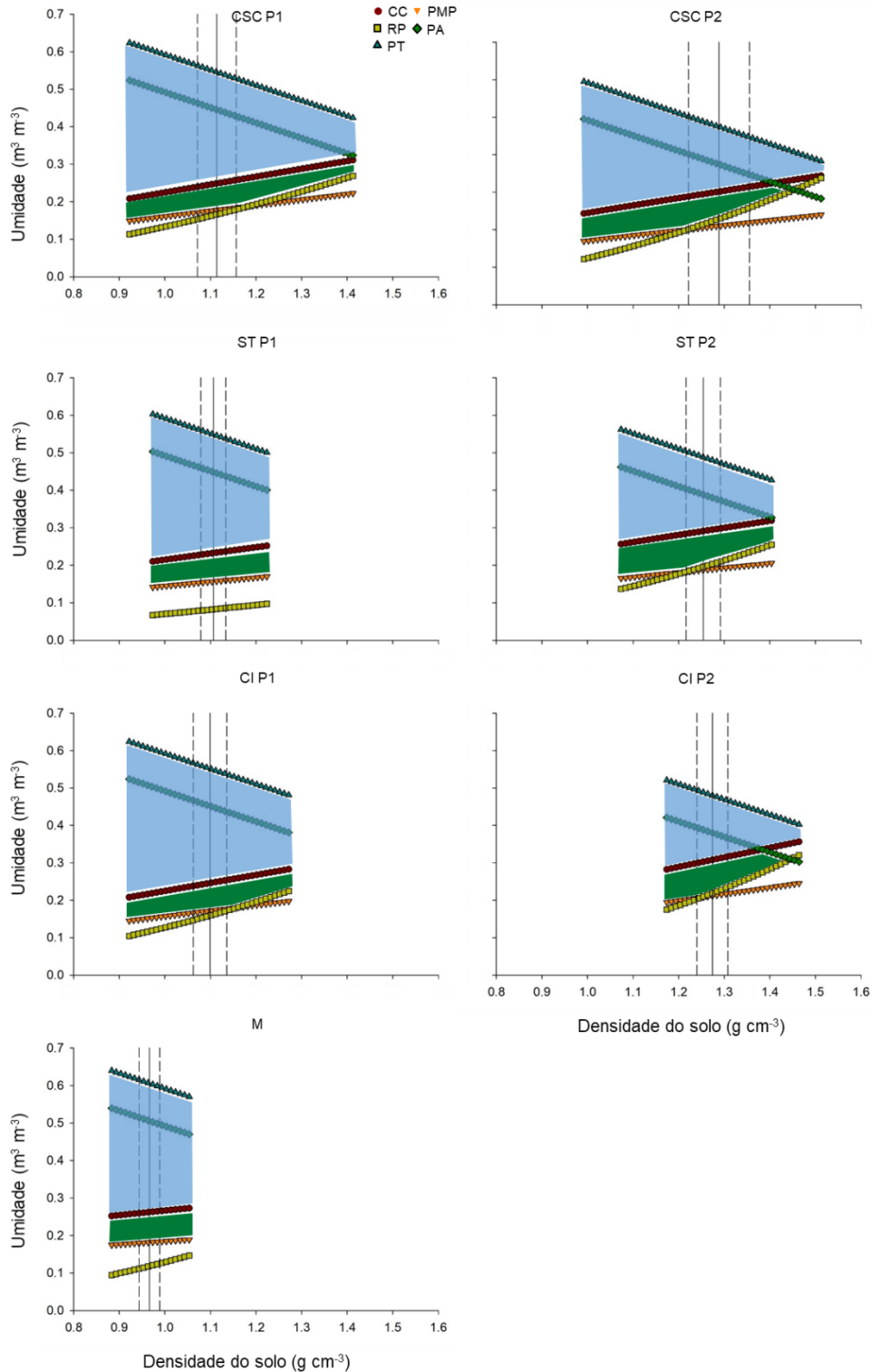
Dentro do estimado pelos modelos houve queda da PD com o incremento de  $D_s$  em todos os casos, mas em nenhum caso esse aumento na  $D_s$  condicionou redução da PD até valores nulos (FIGURAS 4 a 7). Assim, infere-se que a  $D_s$  que acarreta limitações para a planta não é a mesma que limita o processo de recarga de água, medido pela PD. Esses resultados diferem dos observados por Severiano et al. (2011) e Reichert et al. (2009b) que notificaram que a densidade do solo que restringe a macroporosidade, e conseqüentemente a PD, é menor em que aquela que acarreta valores nulos de IHO.

Dentre as situações avaliadas a que apresentou maior PD na camada 0-0,05 m, para o valor de  $D_s$  média, foi a área de mata (0,334 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) seguida por ST S (0,312 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>), conforme pode ser observado na Figura 6. Na camada 0,35-0,40 m o mesmo padrão foi observado, sendo que área de mata apresentou PD igual a 0,271 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e para ST S encontrou-se o valor de 0,220 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> (FIGURA 7). Assim, pode-se observar que o valor de PD encontrado para ST S na camada superficial foi cerca de 6% menor em relação ao observado para a área de mata nessa mesma camada. Já ao compararmos os resultados obtidos para ST S e mata na camada 0,35-0,45 m, a redução da PD foi de cerca 18%. Esses resultados são reflexos da alteração da estrutura do Argissolo, devido ao manejo adotado, implicando em modificação da dinâmica da água ao longo do perfil, como discutido por Benevenuto (2019).

Assim, os resultados apresentados evidenciam a maior QFS da camada 0-0,05 m e na posição S, o que pode ser explicado pela maior presença de raízes e de atividade biológica que promovem a manutenção da estrutura do solo (KIHARA et al., 2012; REICHERT et al., 2016), aliado ao efeito do subsolador, que é mais expressivo nessa camada e posição S. Essa melhor

condição física é explicada pela liberação de exsudatos, criação de bioporos e agregação de partículas no solo rizosférico (KIHARA et al., 2012). Ainda, a posição D por estar próximo da entrelinha na camada 0-0,05 m está sujeita à maior compactação. Já em relação a 0,35-0,40 m, a pior QFS está relacionada ao fato da haste do subsolador não ter atingido essa posição, não rompendo, portanto, o adensamento, ou ocorreu a reestruturação do solo após quatro anos do preparo da área.

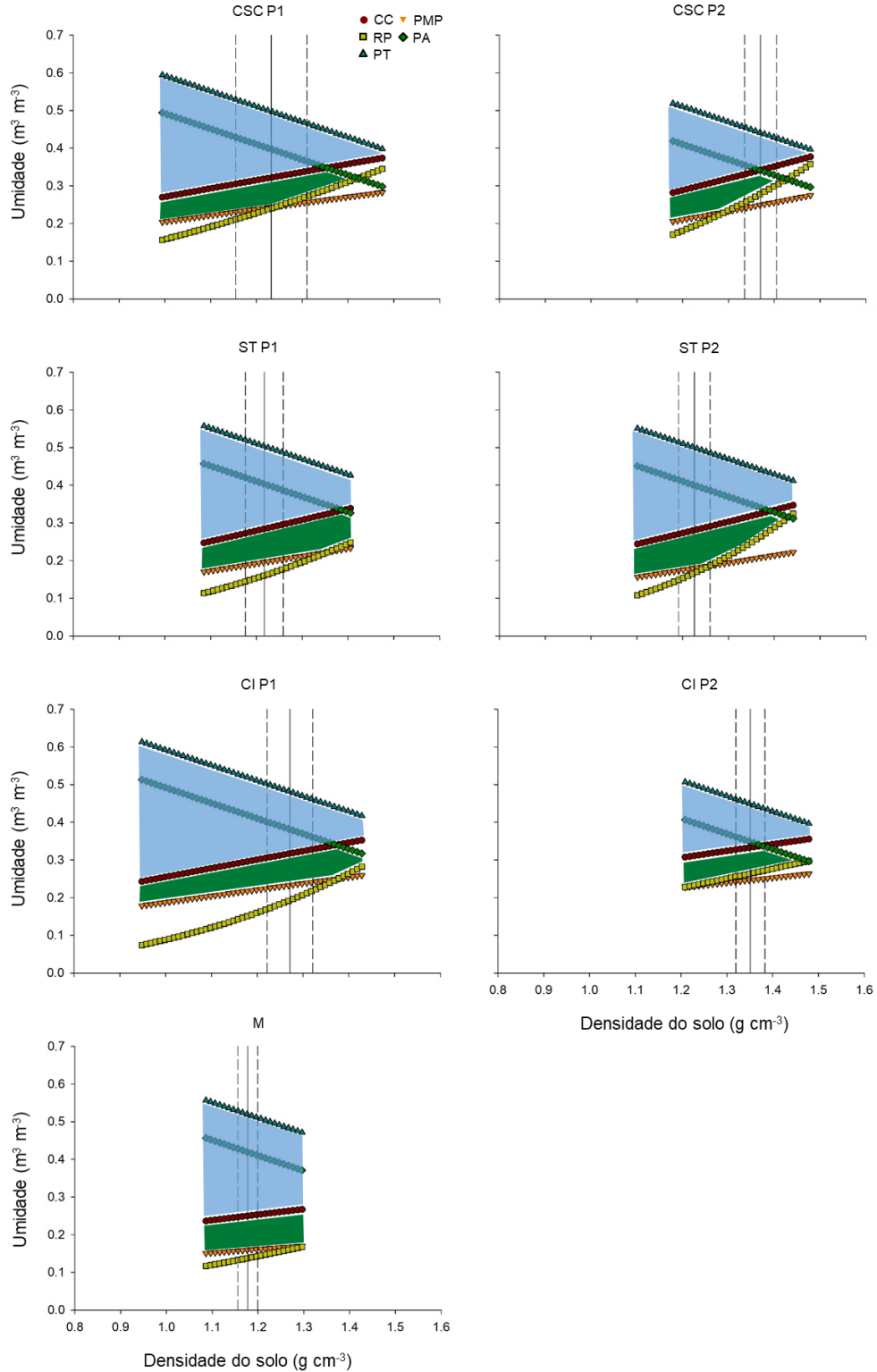
Figura 2 - Modelagem da variação umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (PA), resistência à penetração do solo de  $2,2 \text{ MPa}$  (RP) e porosidade total (PT), em função da densidade do solo ( $D_s$ ) para cada situação amostrada na camada 0-0,05 m. A área colorida em azul e verde indicam a variação da PD e do IHO com a  $D_s$ , respectivamente. As linhas verticais sólidas indicam a  $D_s$  média e as linhas tracejadas indicam o intervalo de confiança (IC=95%) para  $D_s$  em cada situação amostrada.



Fonte: Do autor (2020)

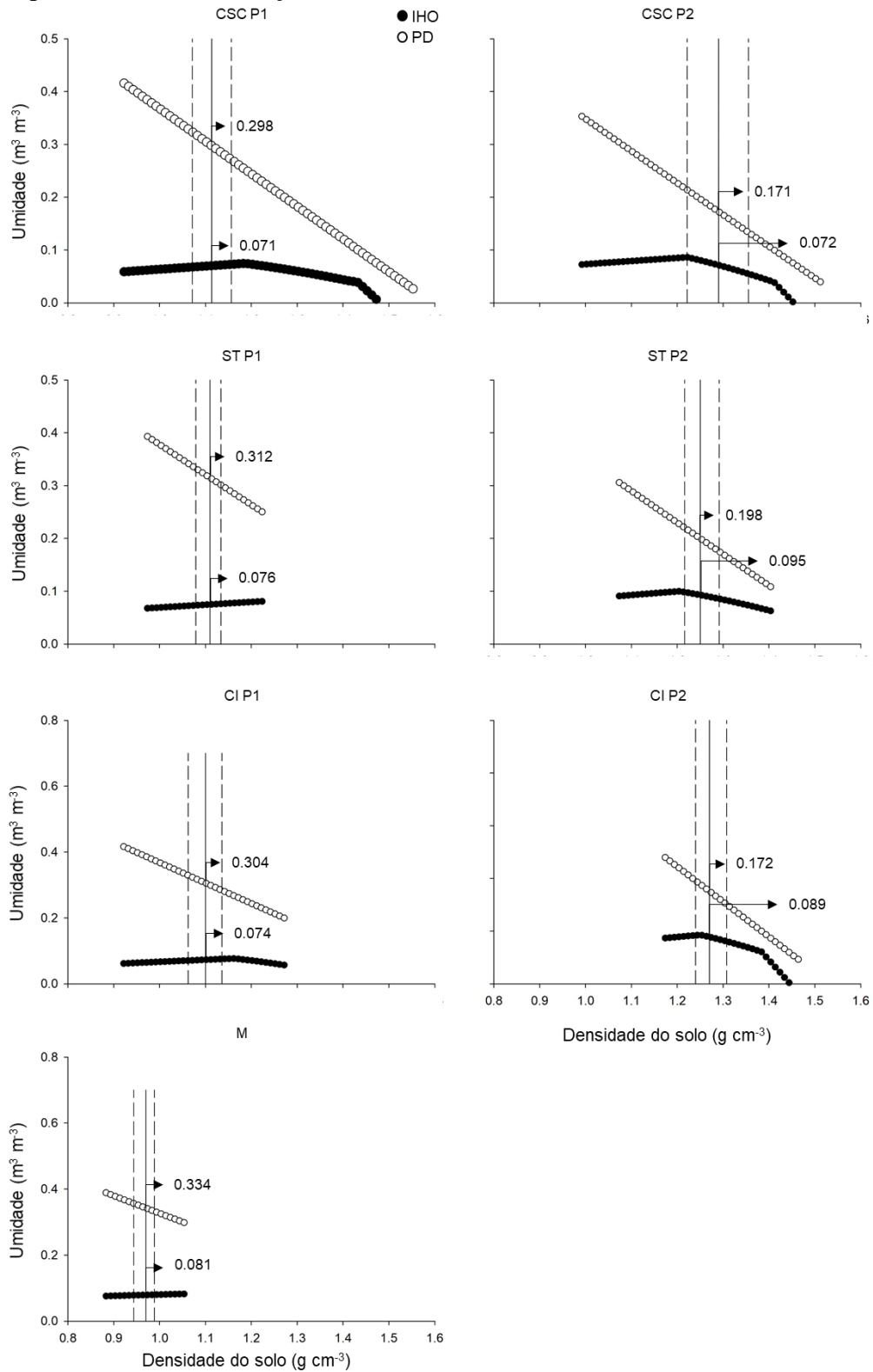


Figura 3 - Modelagem da variação umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) na capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), porosidade de aeração de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (PA), resistência à penetração do solo de  $2,2 \text{ MPa}$  (RP) e porosidade total (PT), em função da densidade do solo ( $D_s$ ) para cada situação amostrada na camada  $0,35\text{-}0,40 \text{ m}$ . A área colorida em azul e verde indicam a variação da PD e do IHO com a  $D_s$ , respectivamente. As linhas verticais sólidas indicam a  $D_s$  média e as linhas tracejadas indicam o intervalo de confiança (IC=95%) para  $D_s$  em cada situação amostrada.



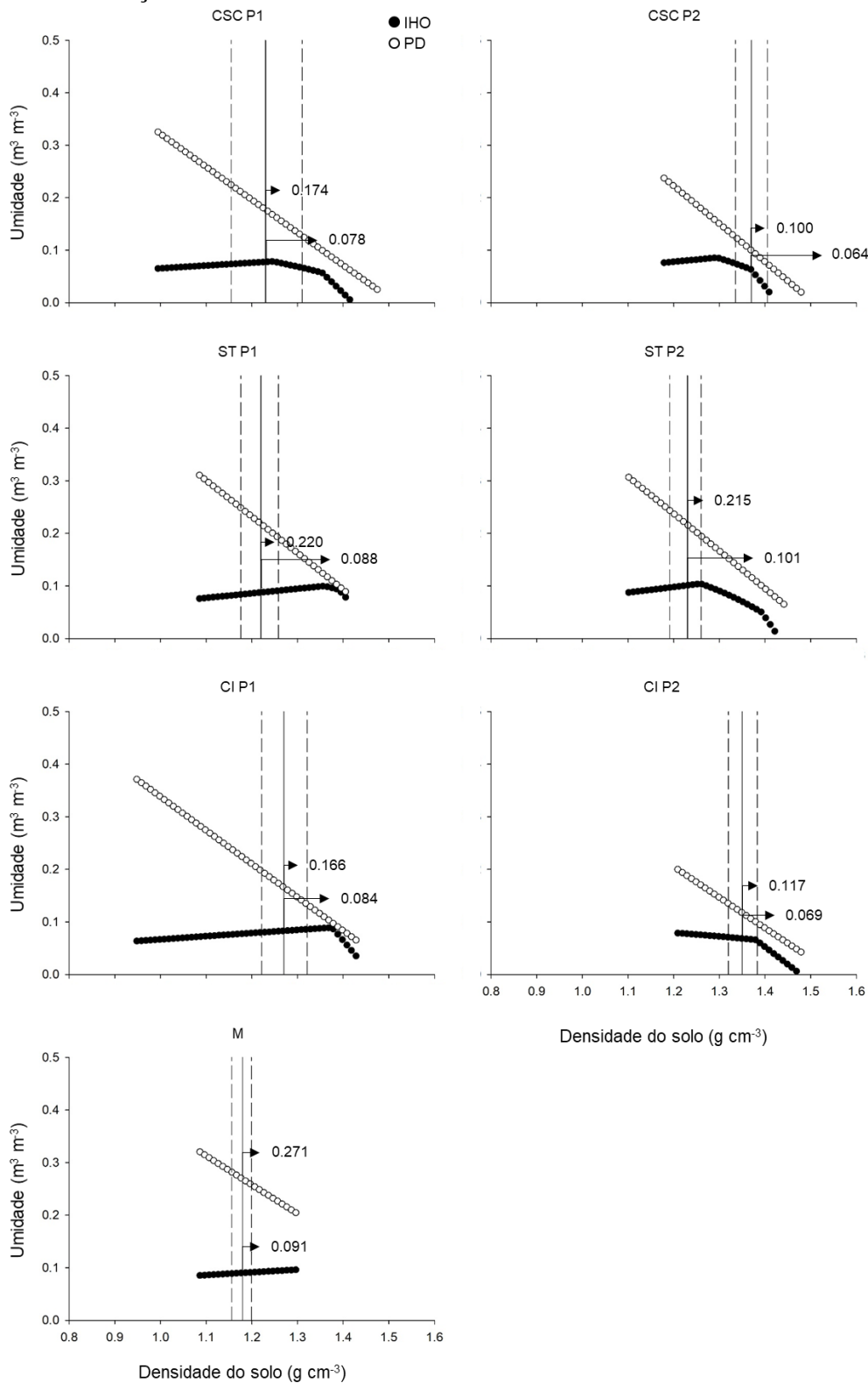
Fonte: Do autor (2020)

Figura 4 - Modelagem da variação da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e na porosidade drenável (PD) em função da densidade do solo ( $D_s$ ) para cada situação amostrada na camada 0-0,05 m. As linhas verticais sólidas indicam a  $D_s$  média e as linhas tracejadas indicam o intervalo de confiança (IC=95%) para  $D_s$  em cada situação amostrada.



Fonte: Do autor (2020)

Figura 5 - Modelagem da variação do teor de água do solo ( $\theta$ ) no Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e da porosidade drenável (PD) em função da densidade do solo (Ds) para cada situação amostrada na camada 0,35-0,40 m. As linhas verticais sólidas indicam a Ds média e as linhas tracejadas indicam o intervalo de confiança (IC=95%) para Ds em cada situação amostrada.



Fonte: Do autor (2020)

## 4 CONCLUSÕES

Dentro das condições experimentais estudadas, apenas a primeira hipótese foi confirmada. O manejo adotado para o cultivo de citros em Argissolo, que incluiu o preparo profundo solo, abrandou as limitações decorrentes da camada adensada, aumentando a QFS para o crescimento das plantas e, contribuiu para aumento da água disponível e recarga subterrânea. No entanto, não foi possível verificar se o crescimento radicular diferenciado dos três porta-enxertos promoveu distintos padrões de alteração da porosidade do solo, com consequências na QFS.

A inclusão da porosidade drenável na modelagem do intervalo hídrico ótimo possibilitou inferências acerca da qualidade física do solo para o crescimento vegetal, assim como quanto ao potencial de recarga de água no solo no sistema conservacionista de produção de tangerina estudado.

O sistema de manejo avaliado que inclui preparo profundo do solo e uso de diferentes porta-enxertos para cultivo do citros possibilitou boa qualidade física ao desenvolvimentos das plantas, uma vez que em nenhum caso amostrado, a  $D_s$  média ficou acima da  $D_{sc}$  ( $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ ). Contudo não foi possível diferenciar os porta-enxertos quanto à melhoria na qualidade física do solo. No entanto, a posição S (tronco da planta) foi a que apresentou as melhores condições, evidenciando assim o efeito do preparo a partir da sulcagem, subsolagem (duas passadas) e preparo da cova.

Destaca-se que a densidade do solo que acarreta limitações para o desenvolvimento da planta é menor em relação àquela que irá limitar o processo de recarga de água, medido pela porosidade drenável.

## REFERÊNCIAS

- ABERCROMBIE, R. A.; PLESSIS, S. F. . The effect of alleviating soil compaction on yield and fruit size in an established Navel orange orchard. **Journal of the Southern African Society for Horticulture Sciences**, v. 5, p. 85–89, 1995.
- ALMEIDA, W. S. DE et al. Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 130–138, 2018.
- ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSra) na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1608–1619, 2012.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- AULER, P. A. M. et al. Produção de laranja “Pêra” em sistemas de preparo de solo e manejo nas entrelinhas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, p. 363–374, 2008.
- BAMBERG, A. L. et al. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 385–394, 2011.
- BARBOSA, S. M. et al. Deep furrow and additional liming for coffee cultivation under first year in a naturally dense inceptisol. **Geoderma**, v. 357, n. September 2019, p. 113934, 2020.
- BASTOS, D. C.; FERREIRA, E. A.; PASSOS, O. S.; SÁ J. F.; ATAÍDE, E. M.; CALGARO, M. Cultivares copa e porta-enxertos para a citricultura brasileira. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.35, p.36-45, 2014.
- BATY, F. et al. A Toolbox for Nonlinear Regression in R : The Package nlstools. **Journal of Statistical Software**, v. 66, n. 5, p. 1–21, 2015.
- BELTRAN, J. M. **Drenaje agrícola**. Madri: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, 1986.
- BENEVENUTE, P. A. N. **Efeitos do preparo do sulco de plantio nos atributos físico-hídricos do solo, no desenvolvimento radicular de plantas e em parâmetros de produção do Citros**. 2019. 89 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.
- BORTOLANZA, D. R.; KLEIN, V. A. Soil chemical and physical properties on an inceptisol after liming (Surface and incorporated) associated with gypsum application. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 40, p. 1–13, 2016.
- BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. February, p. 105–125, 2018.
- BUSARI, M. A. et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, p. 119–129, 2015.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 759–771, 2011.

CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77–86, 2011.

CARVALHO, L. M.; CARVALHO, H. W. L.; SOARES FILHO, W. S.; MARTINS, C. R.; PASSOS O. S. Porta-enxertos promissores, alternativos ao limoeiro 'Cravo', nos Tabuleiros Costeiros de Sergipe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.2, p.132-141, 2016.

CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 54–62, 2016.

CHEN, G.; WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil & Tillage Research**, v. 136, p. 61–69, 2014.  
CHERUBIN, M. R. et al. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **Plos One**, v. 11, n. 3, p. 1–26, 2016.

COLLARES, G. L. et al. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 11, p. 1663–1674, 2006.

FAO. FAOSTAT.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 515–524, 1999.

FIDALSKI, J. et al. Produção de frutos de laranjeira “Pêra” e teores de nutrientes nas folhas e no solo, em Latossolo Vermelho-Escuro do noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 273–279, 1999.

FIDALSKI, J. et al. Qualidade física do solo sob sistemas de preparo e cobertura morta em pomar de laranja. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 44, n. 1, p. 76–83, 2009.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de *Brachiaria ruziziensis*, em sistema intergração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 775–783, 2013.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P. DA. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 4, p. 448–453, 2010.

GUEDES FILHO, O.; BLANCO-CANQUI, H.; SILVA, A. P. DA. Least limiting water range of the soil seedbed for long-term tillage and cropping systems in the central Great Plains, USA. **Geoderma**, v. 207–208, p. 99–110, 2013.

GUIMARÃES, R. M. L. et al. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 1512–1521, 2013.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, p. 121–145, 2005.

IBGE. Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. 2018.

IBGE. **Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil: Províncias estruturais, compartimentos de relevo, tipos de solos, regiões fitoecológicas e outras áreas**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

IMHOFF, S. et al. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 11–18, 2001.

KIHARA, J. et al. Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya. **Applied Soil Ecology**, v. 58, p. 12–20, 2012.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods I. In: **Methods of Soil Analysis Part. 1**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635–662.

KUNCORO, P. H. et al. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil and Tillage Research**, v. 143, p. 180–187, 2014.

LEAO, T. P.; SILVA, Á. P. DA. A simplified Excel algorithm for estimating the Least Limiting Water Range of soils. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 6, p. 649–654, 2004.

LEÓN, H. N. et al. Medium-term influence of conventional tillage on the physical quality of a Typic Fragiudult with hardsetting behavior cultivated with sugarcane under rainfed conditions. **Catena**, v. 175, n. December 2018, p. 37–46, 2019.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advances in Soil Science. Soil Sci.**, v. 1, p. 277–294, 1985.

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo Hídrico Ótimo e porosidade de solos cultivados em área de proteção ambiental do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1087–1095, 2009.

LIMA, V. M. P. et al. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 1, p. 71–78, 2012.

LIU, Z. et al. Yield response of spring maize to inter-row subsoiling and soil water deficit in Northern China. **Plos One**, v. 11, n. 4, 2016.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 1, p. 163–170, 2006.

MATTOS JUNIOR, D. et al. **Citros: principais informações e recomendações de cultivo** Boletim 200 Instituto Agronômico de Campinas, , 2005.

MEDEIROS, J. C. et al. Deep subsoiling of a subsurface-compacted typical hapludult under citrus orchard. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 911–919, 2013.

MELLO, C. R. DE et al. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 9, p. 1319–1324, 2002.

MENEZES, M. D. DE et al. Spatial prediction of soil properties in two contrasting physiographic regions in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 3, p. 274–285, 2016.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39–47, 2018.

MISHRA, A. K. et al. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. **Soil and Tillage Research**, v. 150, p. 43–56, 2015.

NUÑEZ-MORENO, J. H.; VALDEZ-GASCON, B. Effect of soil conditions on orange trees. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, n. 9–10, p. 1747–1753, 1994.

OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A. P.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil Use and Management**, v. 26, n. 4, p. 485–493, 2010.

OLIVEIRA, I. N. et al. Least limiting water range as influenced by tillage and cover crop. **Agricultural Water Management**, v. 225, n. September, p. 105777, 2019.

PIKUL, J. L.; AASE, J. K. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, p. 859–866, 2003.

PINTO, L. C. et al. Land-use effect on hydrogeology in a mountainous region of Southeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 4, p. 413–427, 2017.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Editora Agrícola Española, 1978.

PRADO, E. A. F. DO et al. Hydrophysical quality of an Oxisol under a no-tillage system with alternative crops to renew a sugarcane field. **Sugar Tech**, v. 20, n. 2, p. 135–142, 2018.

PRADO, R. B. et al. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1021–1038, 2016.

PRANDO, M. B. et al. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 693–700, 2010.

R STUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R** Boston, 2018. Disponível em: <<http://www.rstudio.com/>>

RABOT, E. et al. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018.



REICHERT, J. M. et al. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 3, p. 310–319, 2009a.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242–254, 2009b.

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 123–136, 2016.

REYNOLDS, W. D. et al. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, p. 466–474, 2008.

REYNOLDS, W. D. An analytic description of field capacity and its application in crop production. **Geoderma**, v. 326, p. 56–67, 2018.

SAFADOUST, A. et al. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. **Agricultural Water Management**, v. 136, p. 34–41, 2014.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SCHNEIDER, F. et al. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 193–204, 2017.

SERAFIM, M. E. et al. Potencialidades e limitações de uso de Latossolos e Cambissolos, sob sistema conservacionista em lavouras cafeeiras. **Bio**, v. 29, n. 6, p. 1640–1652, 2013a.

SERAFIM, M. E. et al. Qualidade física e Intervalo Hídrico Ótimo em Latossolo e Cambissolo, cultivados com cafeeiro, sob manejo conservacionista do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 733–742, 2013b.

SEVERIANO, E. DA 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, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the Least Limiting Water Range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775–1781, 1994.

SILVA, B. M. et al. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 103–113, 2015.

SILVA, É. A. et al. Stability of soil aggregates in Latosols and Cambisols via standard method and sonification. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 39, p. 3894–3903, 2016.

SILVA, G. L. et al. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v. 167–168, p. 61–70, 2011.

SIMOES, R. P. et al. Using conservation systems to alleviate soil compaction in a Southeastern United States ultisol. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 106–114, 2009.

SOARES FILHO, W. S; CUNHA SOBRINHO, A. P. PASSOS, O. S. **Limoeiro 'Cravo Santa Cruz': variedade com maior número de sementes**. Embrapa Mandioca e Fruticultura - Fôlder / Folheto / Cartilha (INFOTECA-E), 2003.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, 2014.

SOUZA, L. D. et al. Avaliação de plantas cítricas, em diferentes profundidades de plantio, em Latossolo Amarelo dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 26, n. 2, p. 241–244, 2004.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 211–219, 2007.

TORMENA, C. A. et al. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 122–130, 2017.

TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P. DA; LIBARDI, P. L. Caracterização do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573–581, 1998.

VOGEL, H. J. et al. A systemic approach for modeling soil functions. **Soil**, v. 4, n. 1, p. 83–92, 2018.