



ANDRÉ RIBEIRO SILVEIRA

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DIFERENTES USOS E
FLORESTA NATIVA**

**LAVRAS – MG
2024**

ANDRÉ RIBEIRO SILVEIRA

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DIFERENTES USOS E FLORESTA NATIVA

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

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS-MG
2024**

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

Silveira, André Ribeiro.

Qualidade física do solo em diferentes usos e floresta nativa /
André Ribeiro Silveira. - 2023.

110 p.

Orientador(a): Moacir de Souza Dias Junior.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Física do Solo. 2. Pressão de pré-consolidação. 3. Atributos físicos do solo. I. Dias Junior, Moacir de Souza. II. Silva, Bruno Montoani.

ANDRÉ RIBEIRO SILVEIRA

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM DIFERENTES USOS E FLORESTA NATIVA

PHYSICAL QUALITY OF SOIL IN DIFFERENT USES AND NATIVE FOREST

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

Aprovado em 20 de dezembro de 2023

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior	UFLA
Profa. Dra. Fatima Maria de Souza Moreira	UFLA
Prof. Dr. Felipe Haenel Gomes	UFLA
Prof. Dr. Wellington Willian Rocha	UFVJM
Prof. Dr. Angelo Marcio Pinto Leite	UFVJM

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Júnior
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

LAVRAS – MG
2024

A Deus por sempre iluminar, proteger e guardar toda minha caminhada. Também a minha família, minha mãe Estela, meu pai Tuzeca, meus irmãos José Olímpio, João Carlos e Raul, minhas cunhadas Carol e Elaine, meus afilhados Wallerrson, Letícia, José Luis, Felipe e minha esposa Carolina por todo amor e companheirismo. Sem vocês essa caminhada dura e árdua seria impossível. Obrigado por serem minha luz, meu caminho, minha esperança de conquistar e lutar em busca de todos os meus objetivos e sonhos.

Obrigado por serem meu exemplo de vida!

Dedico

AGRADECIMENTOS

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

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de doutorado e demais recursos financeiros para o desenvolvimento do experimento, no projeto de rede, BIODIVERSIDADE DO SOLO PARA O AUMENTO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA E FLORESTAL SUSTENTÁVEL. MODALIDADE: “EDITAL 09/2016 - REDES DE PESQUISA, TECNOLÓGICA E DE INOVAÇÃO”
PROCESSO N. : Fapemig CAG - RED-00330-16

À CAPES, CNPq pelos recursos financeiros destinados aos programas de Pós-Graduação e projetos de pesquisa.

A todos os professores e funcionários do DCS/UFLA, especialmente os professores Moacir de Souza Dias Júnior, Bruno Montoani Silva, Fatima Maria de Souza Moreira, Júnior Cesar Avanzi, e os técnicos Doroteo, Dulce e Pezão.

Aos meus professores Wellington Willian e Ângelo Márcio por estarem comigo desde o início dessa minha longa e árdua jornada, obrigado por sempre acreditar em mim!

A Universidade Federal do Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM por todos ensinamentos e apoio durante essa jornada.

A todos os colegas de departamento, pelos momentos de aprendizado e descontração durante esse período.

A todos os membros do grupo de pesquisa, professores e estudantes de iniciação científica, por toda ajuda nas coletas e análises de laboratório.

À toda minha família pelo apoio, palavras e gestos de carinho.

RESUMO GERAL

O entendimento do processo de compactação do solo e a busca por alternativas para mitigar seus efeitos têm motivado a realização de estudos em escala global, uma vez que a compactação é considerada uma das principais ameaças à manutenção da qualidade do solo em áreas agrícolas e florestais. Objetivou-se neste trabalho verificar alterações provocadas por diferentes tipos de usos na qualidade física do solo, bem como nas suas propriedades em relação as melhorias e produtividade em áreas cafeeiras em um latossolo vermelho-amarelo e um latossolo vermelho. As áreas de uso correspondente ao sistema ILPF (Integração lavoura pecuária floresta) e ao CE (Cerrado) não apresentaram diferença significativa entre si quanto a σ_p (Pressão pré-consolidação), devido a ambas as áreas terem sofrido pisoteio animal e, ou tráfego de máquinas. Por outro lado, houve diferença significativa entre o sistema ILPF e o CE em relação a FN (Floresta nativa), tendo estes dois usos do solo apresentando uma maior σ_p . Os usos CE e PEX (Pastagem extensiva) apresentaram também os menores valores de umidade ótima de compactação ($U_{ót}$), dado seu estado de consolidação pelo não revolvimento do solo e pisoteio de animais, bem como os maiores de grau de compactação (GC), indicando uma maior alteração estrutural do solo quando comparados com a FN. Todos os sistemas apresentaram valores de velocidade de infiltração básica (VIB) inferiores ao da FN, indicando, que a atividade antrópica interferiu na estrutura do solo. Para as áreas cafeeiras, onde há uma maior produtividade, são áreas que possuem uma maior quantidade de M.O e um maior volume de *Brachiaria* sp. E na avaliação da resistência a penetração de cada um desses solos observa-se que esse tipo de manejo influencia diretamente na diminuição da compactação do solo, isso ocorre pois de acordo com a M.O promove uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo, deixando-o menos coeso, mais friável.

Palavras-chave: Usos do solo. Matéria orgânica. Propriedades físicas. Latossolo.

GENERAL ABSTRACT

Understanding the soil compaction process and the search for alternatives to mitigate its effects have motivated studies on a global scale, since compaction is considered one of the main threats to maintaining soil quality in agricultural and forestry areas. The objective of this work was to verify changes caused by different types of uses in the physical quality of the soil, as well as in its properties in relation to improvements and productivity in coffee growing areas in a red-yellow latosol and a red latosol. The areas of use corresponding to the ILPF system (Crop-livestock-forest integration) and the CE (Cerrado) did not show a significant difference between them in terms of σ_p (Pre-consolidation pressure), due to both areas having suffered animal trampling and/or traffic of machines. On the other hand, there was a significant difference between the ILPF and CE systems in relation to FN (Native Forest), with these two land uses presenting a higher σ_p . The uses CE and PEX (Extensive grazing) also presented the lowest values of optimum compaction moisture ($U_{ót}$), given their state of consolidation due to the non-disturbing of the soil and trampling by animals, as well as the highest degree of compaction (GC), indicating a greater structural change in the soil when compared to FN. All systems presented basic infiltration velocity (VIB) values lower than the FN, indicating that human activity interfered with the soil structure. For coffee growing areas, where there is greater productivity, these are areas that have a greater quantity of M.O and a greater volume of *Brachiaria* sp. And when evaluating the resistance to penetration of each of these soils, it is observed that this type of management directly influences the reduction of soil compaction, this occurs because, according to the M.O, it promotes a decrease in the load pressure applied to the soil structure, leaving it less cohesive, more friable.

Keywords: Land uses. Organic matter. Physical properties. Latossolo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de compressão do solo.....	33
Figura 2. Forças de coesão e adesão do mercúrio e da água	35
Figura 3. Representação esquemática do solo como reservatório de água, indicando as faixas de conteúdo de água e os seus limites.....	38
 Artigo 1 – CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGAS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DUAS ALTERNATIVAS DE USO DO SOLO E SOB FLORESTA NATIVA	
Figura 4. Localização das áreas de estudo.....	59
Figura 5. Modelos de capacidade de suporte de carga do CE, ILPF e FN.....	62
Figura 6. Modelos de capacidade de suporte de carga do CE, ILPF e FN.....	63
 Artigo 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO SOB DIFERENTES USOS DO SOLO E FLORESTA NATIVA	
Figura 7. Localização das áreas de estudo.....	72
Figura 8. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o PE.....	79
Figura 9. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para ILPF.....	79
Figura 10. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o CE.....	80
Figura 11. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o PCM.....	80
Figura 12. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para a PEX.....	81
Figura 13. Modelagem do solo à penetração versus Umidade para a FN.....	81
 Artigo 3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO EM PARES DE ÁREAS CAFEEIRAS EM COMPARAÇÃO COM A FLORESTA NATIVA	
Figura 14. Localização das áreas de estudo.....	91
Figura 15. Par de área, CA20 x CA16.....	92
Figura 16. Par de área SA25 x SA29.....	96
Figura 17. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para o par de área BL x GA, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	97
Figura 18. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área BII x BIII, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	97

Figura 19. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área S5 x S4, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	98
Figura 20. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área CA16 x CA20, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	98
Figura 21. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área SA25 x SA29, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	99
Figura 22. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área BL x GA, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	99
Figura 23. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área BII x BIII, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	100
Figura 24. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área S5 x S4, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	100
Figura 25. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área CA16 x CA20, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	101
Figura 26. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área SA25 x SA29, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.....	101
Figura 27. Modelos de capacidade de suporte de carga na camada superficial para os pares de área e Floresta nativa.....	104
Figura 28. Modelos de capacidade de suporte de carga na camada do topo do Horizonte B para os pares de área e Floresta nativa.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela. 1. Classificação do tamanho dos poros e algumas de suas funções, de acordo com as classes de tamanhos.....22

Artigo 1 – CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGAS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DUAS ALTERNATIVAS DE USO DO SOLO E SOB FLORESTA NATIVA

Tabela. 2. Análise textural, matéria orgânica e no potencial matricial de – 6kPa para as situações estudadas.....60

Tabela. 3. Teste de significância de acordo com Snedecor & Cochran (1989) entre as curvas compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo nas duas alternativas de uso do solo e FN.....62

Tabela. 4. Pressão de pré-consolidação para as duas alternativas de uso do solo e FN na umidade da capacidade de campo e na umidade a $0,2 \text{ kg kg}^{-1}$ do solo.....64

Artigo 2 – ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO SOB DIFERENTES USOS DO SOLO E FLORESTA NATIVA

Tabela. 5. Caracterização física e matéria orgânica do latossolo vermelho-amarelo (LVAd) extraído na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), submetido a diferentes usos do solo e sob floresta nativa na profundidade de 10-20 cm.....75

Tabela. 6. Médias de densidade e densidade máxima do solo (D_{smax}), umidade ótima de compactação (U_{ot}), umidades na capacidade de campo, correspondente ao potencial matricial de -6 kPa (U_{cc}), grau de compactação e velocidade de infiltração básica para as diferentes alternativas de uso do solo estudados.....76

Tabela. 7. Teste de significância para a diferentes alternativas de uso do solo estudadas, de acordo com Snedecor & Cochran (1989)82

Tabela. 8. Valores de Resistência à Penetração (RP) na umidade correspondente à capacidade de campo, correspondente ao potencial matricial de -6 kPa (U_{cc}).82

Artigo 3 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO EM PARES DE ÁREAS CAFEEIRAS EM COMPARAÇÃO COM A FLORESTA NATIVA

Tabela. 9. Análise textural e matéria orgânica do Latossolo Vermelho típico para as diferentes áreas.....	94
Tabela. 10. Dados de produtividade dos últimos 4 anos fornecidos pelas respectivas fazendas.....	95
Tabela. 11. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga [$s_p = 10(a + bq)$] dos pares de área para a camada superficial 0-3 cm, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989)	103
Tabela. 12. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga [$s_p = 10(a + bq)$] dos pares de área para a camada topo do horizonte B, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989)	104
Tabela. 13. Coeficientes lineares e angulares dos modelos de capacidade de suporte de carga para os pares de áreas e Floresta nativa.....	106

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	14
1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	BIOMAS.....	15
2.2	CAFÉ	17
2.3	DENSIDADE DO SOLO	18
2.4	POROSIDADE	21
2.4.1	Distribuição de poros.....	23
2.4.2	Fatores que podem afetar a distribuição de poros por tamanho	24
2.5	ESTABILIDADE DE AGREGADOS	27
2.6	COMPACTAÇÃO DO SOLO	29
2.7	PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO	31
2.8	MECANISMOS DE RETENÇÃO DE ÁGUA	34
2.9	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA	35
2.10	DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA A PLANTA.....	37
2.10.1	Capacidade De Campo (CC)	39
2.10.2	Ponto De Murcha Permanente.....	39
2.10.3	Capacidade De Água Disponível (CAD)	39
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	 SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	 55
	ARTIGO 1.....	55
1	INTRODUÇÃO	57
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	58
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	ARTIGO 2.....	69
1	INTRODUÇÃO	71
2	MATERIAL E MÉTODOS	72
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74

4	CONCLUSÕES	83
	ARTIGO 3.....	88
1	INTRODUÇÃO	90
2	MATERIAL E MÉTODOS	91
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	94
4	CONCLUSÕES	106
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O solo é a porção superficial da crosta terrestre que fornece as condições necessárias para à vida. Conhecido por sua função de fornecer nutrientes e água para a sustentação dos ecossistemas naturais, na produção de alimentos e na recarga de água subterrânea, como fonte de materiais de construção e outras atividades econômicas. De modo geral, o conjunto de solos denomina-se de pedosfera, sendo que cada solo é constituído de três fases distintas, sólida, líquida e gasosa, onde ocorre a maioria das interações físico-químicas e bioquímicas entre a superfície da terra, as águas subterrâneas e a atmosfera (WILDING; LIN, 2006).

O estudo da variação das propriedades do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo (SILVEIRA et al., 2011), sendo importante para estabelecer se houve degradação ou melhoria da qualidade deste importante recurso produtivo.

A física do solo estuda e define, qualitativa e quantitativamente, as características e propriedades físicas, bem como sua medição, predição e controle, visando entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos e seu papel na biosfera. O correto entendimento do comportamento físico do solo está relacionado ao seu uso e manejo apropriado, embasando de modo adequado a irrigação, drenagem, preparo e conservação de solo e água (REINERT; REICHERT, 2006).

A qualidade física torna-se importante na análise do grau de degradação do solo e na identificação de práticas de uso sustentáveis. Admitindo que a verdadeira preocupação se encontra na qualidade física, ela vem afetando gradualmente a qualidade química e biológica, já que uma se relaciona com a outra. Melhorando a qualidade física de um solo, indiretamente se está contribuindo para a melhoria das suas condições químicas e biológicas (DEXTER, 2004).

Relacionada ao desenvolvimento das plantas, a qualidade física do solo é determinada fundamentalmente pela disponibilidade de água e ar e pela resistência que a matriz do solo oferece ao crescimento das raízes. Modificações significativas que ocorram na estrutura do solo em resposta à compactação, entre outras, provocarão alterações na relação solo-água-ar e na resistência mecânica e, em consequência, no crescimento das plantas em

resposta às propriedades físicas do solo (AHMAD et al., 2009; FERNÁNDEZ et al., 2010; KIM et al., 2010; WEISSKOPF et al., 2010).

O monitoramento da umidade do solo é importante para o estudo da dinâmica da água e o planejamento racional da gestão da água nas atividades agrícolas (ALMEIDA et al., 2017). A retenção de água é uma das variáveis a serem consideradas para o manejo da água no solo, uma vez que é fortemente alterada por práticas de cultivo inadequadas, principalmente em condições físicas de solo precárias (SANTOS et al., 2013).

Cabe ressaltar que retenção de água é a capacidade do solo em reter a água fornecida por precipitação ou irrigação. Já a disponibilidade total de água às plantas é o volume contido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (KLEIN, 2014). Ambos os processos estão intimamente ligados à distribuição dos poros por tamanho, a constar os mesoporos e microporos, que são os poros responsáveis pelo armazenamento da água que será aproveitada pelas plantas (CARDUCCI et al., 2015).

Portanto, é imprescindível que se tenha estudos relacionados a esses atributos físicos do solo e qual a importância de cada um deles, para que se possa ter possíveis diagnósticos de qual a melhor maneira que um solo possa ser trabalhado em seu respectivo bioma.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMAS

De acordo com Coutinho (2006), um bioma é uma área do espaço geográfico, com dimensões de até mais de um milhão de quilômetros quadrados, que tem por características a uniformidade de um macroclima definido, de uma determinada fitofisionomia ou formação vegetal, de uma fauna e outros organismos vivos associados, e de outras condições ambientais, como a altitude, o solo, alagamentos, a salinidade, entre outros. Todas estas características lhes conferem uma estrutura e uma funcionalidade peculiares, uma ecologia própria.

O estado de Minas Gerais se encontra em uma região ecotonal composta pelos domínios da Caatinga, Cerrado e Floresta Atlântica, abrangendo as diversas fitofisionomias que constituem os domínios citados (RIZZINI, 1997). Aliado à grande superfície, à diversidade climática e geomorfológica de Minas Gerais, o caráter ecotonal propicia uma

composição florística mista altamente diversa, onde unidades fitoecológicas com mesclas de espécies Atlânticas, de Cerrado e de Caatinga podem ser observadas (AZEVEDO et al., 2014).

O bioma cerrado é o que abrange a maior parte do território brasileiro e uma das áreas mais importantes da América do Sul, abrangendo as áreas de recarga de importantes aquíferos e rios, e aproximadamente 204 milhões de hectares, o que corresponde a 24% do território brasileiro (MEDRADO; LIMA, 2014); é reconhecido como o “berço das águas do Brasil” (LIMA, 2011). Além disso, o bioma Cerrado brasileiro é um dos 25 *hotspots* de biodiversidade no mundo, com alta diversidade biológica e endêmica, tem sofrido perda de vegetação devido à expansão da agricultura e pastagem (SILVA et al. 2006), o que resultou em um grande número de espécies ameaçadas de extinção (MYERS et al., 2000; RODRIGUES et al., 2020) Essas expansões de agricultura e pastagem também ameaçam os fluxos de córregos das bacias hidrográficas (SILVA; BATES, 2002); no entanto, o entendimento de seus impactos sobre o fluxo de rios no bioma Cerrado ainda é limitado (BEUCHLE et al. 2015). O aprimoramento da base de conhecimento sobre modelagem hidrológica no bioma Cerrado é, portanto, importante para a gestão dos recursos hídricos, pois permite a quantificação da disponibilidade hídrica atual e futura, essencial para garantir a segurança hídrica e o desenvolvimento econômico.

O segundo domínio com maior cobertura do território mineiro é o Atlântico, presente nas regiões do Vale do Rio Doce e Mucuri, região Sul e Sudeste do estado (RIZZINI, 1997). Segundo o IBGE (1993), as fitofisionomias de Floresta Atlântica presentes em Minas Gerais (visto que algumas fisionomias são características de zonas costeiras) são a Floresta Ombrófila Densa, a Floresta Ombrófila Aberta e as Florestas Estacionais Deciduais e Semideciduais. Apesar de constituir a segunda maior área de floresta tropical úmida da América do Sul (após a Amazônia), as Florestas Atlânticas estão entre as mais ameaçadas do mundo, pois estão reduzidas a fragmentos ou remanescentes perturbados, restando apenas 5% de sua cobertura original (OLIVEIRA-FILHO; FONTES, 2000).

Por sua vez, a Caatinga, domínio exclusivo ao território brasileiro, tem ocorrência restrita à região norte em Minas Gerais (SANTOS et al 2012; APGAUA et al. 2014). Apresenta distintas formas de acordo com as modificações do relevo, solo e mesoclima, resultando em uma composição florística variada, com densidade uniforme ou agrupamentos arbóreos interrompidos por áreas descobertas (AB’SABER 2003, SANTOS et al 2012;

APGAUA et al. 2105). É o domínio brasileiro menos conhecido botanicamente, apresentando grande número de espécies endêmicas e com risco de extinção (MMA, 2003).

2.2 CAFÉ

O café é uma planta exótica do Brasil que tem relevante importância socioeconômica para o País, pela sua grande capacidade de geração de empregos e de distribuição de renda no meio rural. O cafeeiro foi introduzido no Brasil em 1727, na cidade de Belém, PA, trazido da Guiana Francesa pelo sargento-mor Francisco de Mello Palheta, a pedido do governador do Maranhão e de Grão-Pará. Já naquela época, o café possuía grande valor comercial (FRAGA, 1963; DIAS; SILVA, 2015).

A cafeicultura é uma atividade muito relevante no Brasil sendo o maior produtor mundial de café (USDA, 2020). A produção de café tem acompanhado a história do país, tornando-se um dos principais contribuintes para seu desenvolvimento econômico (VOLSI et al., 2019), gerando empregos e proporcionando o aumento da renda do produtor rural (ALFONSI et al., 2019). Em 2020 a produção nacional foi de 63,08 milhões de sacas de café, sendo 48,77 milhões de arábica e 14,31 milhões de conillon, em uma área cultivada correspondente a 2,16 milhões de ha. O estado de Minas Gerais é o maior produtor, tendo produzido em 2020 cerca de 34,65 milhões de sacas (CONAB, 2020).

A posição brasileira se deve em grande parte à modernização da agricultura, impulsionada pela introdução de novas tecnologias, entre outras, o melhoramento e a mecanização na produção, reduzindo custos, trazendo assim várias transformações no dia a dia da cafeicultura brasileira (FERREIRA JÚNIOR et al., 2016; SANTINATO et al., 2015). As novas tecnologias tornam-se, assim, um dos principais responsáveis por conferir qualidade à produção, assegurando a posição do Brasil no cenário mundial (MAIA et al., 2020).

No geral, a qualidade do solo tem sido relacionada à capacidade deste recurso de desempenhar suas funções preservando ao máximo suas propriedades biológicas, físicas e químicas, garantindo a manutenção da saúde das plantas e animais (DORAN; PARKIN, 1996).

Apesar dos benefícios, a mecanização pode levar a consequências negativas, degradando tanto o solo como a água, o que tem impulsionado o aumento de pesquisas relacionando à mecanização com a alteração dos atributos do solo e conseqüentemente, a

perda da qualidade nos últimos anos (DEPERON et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2017). Uma das consequências do uso intensivo de máquinas, principalmente quando em condições de umidade inadequadas, é a compactação do solo, o que pode ocorrer durante várias etapas da produção agrícola impactando negativamente sua qualidade (KELLER et al., 2017).

O desenvolvimento da cultura do cafeeiro é afetado pela compactação do solo principalmente devido o aumento do déficit hídrico e as alterações na temperatura do solo, interferindo diretamente na fotossíntese, na condutância estomática, na taxa de fotossíntese líquida e na atividade enzimática (MENEZES-SILVA et al., 2017). Aspectos fisiológicos e a morfologia da planta também são afetados, causando redução do crescimento e do diâmetro das raízes e alterando sua anatomia (POTOCKA; SZYMANOWSKA-PULKA, 2018), diminuição da área foliar (GUBIANI; REICHERT; REINERT, 2014) e induz ao fechamento estomático diminuindo assim a fotossíntese (MORALES et al., 2018). Logo, em solos compactados a planta tem seu funcionamento fisiológico alterado, o que compromete o desempenho produtivo da cultura, principalmente devido ao déficit hídrico, à deficiência nutricional e a deficiência de oxigênio (LIU et al., 2017).

A escolha de cultivares é um importante fator a ser levado em conta na implantação de qualquer cultura. Do ponto de vista da física do solo, existe uma carência de informações relacionadas ao comportamento de cultivares face a limitações estruturais do solo. A maioria das informações está associada ao porte, a rusticidade, a produtividade, a resistência a doenças entre outros aspectos. Assim sendo, é importante a realização de pesquisas que favoreçam a identificação e indicação de cultivares mais adaptadas e responsivas a tais limitações. Algumas cultivares têm potencial para maior tolerância à seca, outras possuem um sistema radicular mais rústico (CARVALHO et al., 2017) e outras se ajustam melhor a condições restritas de porosidade. O bom desenvolvimento das plantas depende das interações entre os atributos do solo com o ambiente radicular (CARDUCCI et al., 2014), logo cultivares com sistema radicular mais vigoroso permitem uma maior eficiência na absorção e partição de nutrientes mesmo em condições restritas da qualidade física do solo.

2.3 DENSIDADE DO SOLO

Para avaliar os atributos físicos de um solo torna-se necessário um monitoramento de sua qualidade, os quais são importantes para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A densidade do solo (Ds) tem sido utilizada como medida da qualidade do solo devido às suas

relações intrínsecas com outros atributos tais como porosidade, umidade do solo e condutividade hidráulica. (COSTA et al., 2007; DAM et al., 2005; MARTINS et al., 2009; THIMÓTEO et al., 2001). Reichardt e Timm (2008) Como o solo é um material poroso, por compressão a mesma massa pode ocupar um volume menor. Isto muda a sua estrutura, o arranjo e volume dos poros e as características de retenção de água.

A D_s , conforme Klein (2008), é uma relação entre massa de solo seco e seu volume, sendo, portanto, afetada por modificações na estrutura e no arranjo e volume dos poros. Solos arenosos apresentam densidade do solo superior aos argilosos enquanto solos siltosos apresentam densidade intermediária (BUENO; VILAR, 1998; LIBARDI, 2005). Solos argilosos apresentam agregação das partículas de argila, da qual resulta a porosidade intra-agregados, que aumenta o volume do espaço poroso, principalmente aqueles poros com diâmetro reduzido (BRADY; WEIL, 2008). O aumento no teor de matéria orgânica reduz a densidade do solo pelo efeito positivo na estabilidade estrutural do solo (ARAGÓN et al., 2000; BRAIDA et al., 2006; DIAS JÚNIOR; MIRANDA, 2000; LIBARDI, 2005).

A variabilidade espacial da D_s é afetada pelo manejo agrícola, pelo tipo de solo e pela profundidade de amostragem. A quantidade de amostras necessárias para determinação da D_s é uma dúvida comum entre pesquisadores. Ao se coletar amostras de solo, a variabilidade dos resultados é destinada, habitualmente, a erros de metodologia na amostragem e a sua heterogeneidade, em profundidade e no sentido horizontal. Logo, fica difícil identificar e separar a interferência de cada um desses fatores; entretanto, a experiência tem indicado que se a amostragem for feita cuidadosamente, a principal fonte de variação é a heterogeneidade do solo. Portanto, quanto mais heterogêneo o solo, maior o número de amostras necessárias. Por isso, vários métodos de determinação da D_s têm sido desenvolvidos para melhorar estas amostragens, possibilitando a redução do número de amostras necessárias e do custo de execução do esforço amostral para o planejamento de sistemas de uso e manejo do solo. Isto é particularmente importante nos estudos de variabilidade espacial de atributos físicos do solo (TIMM et al., 2006; WARRICK; NIELSEN, 1980).

Para a determinação da D_s se utiliza alguns métodos, sendo que o mais utilizado e considerado padrão, é o método do anel volumétrico, o qual consiste na amostragem de solo com estrutura preservada num anel (cilindro metálico) de volume conhecido. Na coleta do anel volumétrico, deve-se tomar o cuidado para não compactar a amostra e para preencher todo o espaço do anel com solo. Outro método utilizado, o do torrão parafinado, que consiste na coleta de torrões de volume variável, secos ao ar, e impermeabilizados com parafina

líquida. O volume dos torrões é determinado pelo volume de água deslocado pelos mesmos quando imersos em água (REICHARDT; TIMM, 2008).

O método do anel volumétrico é considerado como o método padrão e amostragem para avaliação da porosidade total (Pt) e da Ds. Esse método é criticado por provocar uma possível compactação do solo pelo atrito cilindro-solo durante a penetração do mesmo no solo, principalmente quando o solo estiver com umidade acima do ponto de friabilidade, ou de fraturar ou cisalhar o solo quando o mesmo estiver seco (BLAKE; HARTGE, 1986). O método do torrão (MT) apresenta a desvantagem de poder segregar a amostra pela ocasião da coleta dos torrões em solos que foram mobilizados e não completamente reconsolidados, desconsiderando os macroporos existentes entre os torrões. O MT é bastante útil em solos pedregosos, ou quando o solo estiver muito seco que impeça a penetração do cilindro no solo (SILVA et al., 2000).

Ainda de acordo com Silva (2000), no MT, os valores de Ds foram maiores e os de Pt menores do que aqueles obtidos pelo MC. Esse fato pode estar associado à penetração da parafina em macroporos e fendas existentes no torrão, ou à perda de macroporos e segregação no momento da coleta dos torrões acarretando maiores valores de Ds (BLAKE; HARTGE, 1986) e menores valores de macroporos. Vanremortel e Shields (1993) também encontraram valores maiores de Ds para o MT do que para o MC. Quando comparado com o MC, o MT apresentou os maiores valores de microporos e de Ds e, conseqüentemente, menores de Pt.

Além desses métodos aparecem alguns mais modernos e baseiam-se em técnicas nucleares. Entre estas técnicas, a tomografia computadorizada tem sido utilizada há mais de duas décadas principalmente em estudos de compactação do solo e seus efeitos na produção agrícola e degradação do solo (PIRES et al., 2010; TIMM et al., 2005). A tomografia computadorizada permite a determinação dos valores médios de parâmetros físicos do solo e a identificação e localização exata da ocorrência de heterogeneidade com gradiente de densidade ou de umidade.

A Ds e a Pt são as propriedades do solo frequentemente utilizados para caracterizar a compactação do solo (PANAYIOTOPOULOS et al., 1994; LIPIEC; HATANO, 2003). Para cada classe de solo há uma densidade crítica (Dsc), a partir da qual a resistência à penetração e aeração tornam-se restritiva ou impeditiva do crescimento das raízes (KELLER; HÄKANSSON, 2010). A Ds do solo está relacionada direta ou indiretamente com a distribuição de poros, propriedades mecânicas e processos de transporte de água e gases no solo, motivo pelo qual é usada como termo independente no intervalo hídrico ótimo (IHO)

(SILVA et al., 1994) e como fator indireto de restrições físicas ao crescimento das plantas (LETEY, 1985; REICHERT et al., 2003). Neste sentido, estabeleceu-se o conceito de densidade crítica para o crescimento das plantas como aquela que corresponde ao valor zero do IHO. Contudo há discordâncias entre as respostas das plantas em solos com valores de D_s iguais ou maiores que a D_{sc} (GUBIANI, 2012), sendo considerado que ela representa uma densidade próxima da restritiva ao crescimento das plantas e produção das culturas (REICHERT et al., 2009).

A D_{sc} pode ser verificada também por via direta, através de análise de regressão entre diferentes níveis de D_s e as respostas dos cultivos em termos de crescimento aéreo, radicular e produtividade (DE MARIA et al., 1999; BEUTLER et al., 2005; FREDDI et al., 2008; MONTONARI et al., 2010). Aumento do grau de compactação, e conseqüentemente da D_s , não é necessariamente prejudicial ao crescimento das culturas, pois, poderia melhorar o contato solo-raiz e contribuir para o armazenamento de água do solo e capacidade de suporte de carga (REICHERT et al., 2009).

2.4 POROSIDADE

O espaço poroso do solo, é constituído por poros de diferentes tamanhos e formas que influenciam na infiltração, armazenamento e drenagem da água; movimento e a distribuição de gases e crescimento radicular (BRADY; WEIL, 2013).

A distribuição dos poros por tamanho na matriz do solo, é um importante atributo físico, pois desempenha funções fundamentais nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, condicionando ao solo, comportamentos na relação solo-planta e influenciando a potencialidade agrícola dos solos (Tabela 1) (CUNHA, et al. 2010). Sendo assim, a distribuição dos poros condiciona o seu comportamento físico hídrico do solo. Por esta razão, o estudo da porosidade é, portanto, uma das maneiras de caracterizar e quantificar essas propriedades do solo (GUERIF, 1984).

Para Resende (1997), a presença de poros com diferentes diâmetros (Tabela 1), é um fator primordial na qualidade e fertilidade do solo, que influi diretamente na produtividade das culturas, pois interfere no teor de água disponível para as plantas e absorção de nutrientes. Sendo assim, considerando a estrutura do solo, como um arranjo de partículas, pode-se afirmar a grande importância a relação entre a estrutura e o tamanho de poros.

Tabela 1. Classificação do tamanho dos poros e algumas de suas funções, de acordo com as classes de tamanhos.

Classe simplificada	Classe de tamanho e limite de diâmetro	Variação no diâmetro efetivo (mm)	Características e funções
Macroporos	Macroporos	+ 5 – 0,08	Drenagem de água gravitacional; transmitem ar de maneira eficaz; importante no crescimento das raízes; habitar de alguns organismos do solo.
Microporos	Mesoporos	0,08 – 0,03	Retém água após a drenagem e água disponível para as plantas; Movimentação de água por capilaridade; habitat de fungos e pelos radiculares.
	Microporos	0,03 – 0,005	Retenção de água disponível às plantas; habitat da maioria das bactérias.
	Ultramicoporos	0,005 – 0,0001	Presentes em agrupamentos de argila; retenção de água não disponível às plantas;
	Criptoporos	<0,0001	Seu tamanho exclui todos os microrganismos e as moléculas de maior tamanho.

Fonte: Brady & Weil (2013).

Apesar da ampla distribuição de tamanhos, alguns autores utilizam duas categorias de tamanhos, fazendo referências apenas aos macroporos (maiores do que 0,08 mm) e aos microporos (menores do que 0,08 mm) (VAN LIER, 2010). Entretanto, para Richards (1965) classifica em macroporos os poros com diâmetro maior que 0,05 mm e microporos os com diâmetro menor que 0,05 mm.

Sendo assim, pode-se considerar que os macroporos, são responsáveis pela aeração do solo, assim como da movimentação da água de drenagem (BRADY; WEIL, 2013).

Van Lier (2010), ressalta que além da importância de atributos químicos e físicos, o crescimento e desenvolvimento das plantas, estão diretamente relacionados com a porosidade de aeração do solo. Esta aeração consiste nas trocas gasosas do CO₂ presente no espaço poroso do solo pelo O₂ atmosférico produzido através do processo respiratório das raízes. Portanto, para que a aeração do solo seja realizada adequadamente, é necessário que parte da porosidade do solo, seja constituída por macroporos, pois a taxa de difusão desses gases é menor na água e 10.000 vezes maior no ar (VAN LIER, 2010).

Em solos arenosos, há grande quantidade de macroporos, onde podem ocorrer como espaços entre os grãos individuais de areia. Assim, solos arenosos conferem uma baixa capacidade de retenção de água e apresentam uma alta permeabilidade em função do maior diâmetro dos poros (BRADY e WEIL, 2013).

Em solos bem estruturados, onde prevalecem a cobertura natural, isto é, em áreas de vegetação natural, é possível verificar maiores valores de macroporosidade e condutividade hidráulica saturada (K_0) que proporcionam adequado desenvolvimento das e conservação do solo e da água (SILVA; KATO, 1997). Na área de cerrado virgem, Silva e Kato (1997), puderam observar que o K_0 foi cerca de 20 vezes maior do que na área de plantio direto e três vezes maior na área de plantio convencional. Este fato, evidencia a importância da macroporosidade na condutividade hidráulica saturada, e a redução desta, provoca redução nos valores de K_0 .

Os microporos por sua vez, ao contrário do que ocorre com os macroporos, são geralmente ocupados por água, e em função do menor tamanho de poros, não permite uma maior movimentação do ar (BRADY; WEIL, 2013). Sendo assim, os microporos podem ser definidos como poros de armazenamento de água às plantas, enquanto os criptoporos são aqueles poros nos quais a água pode permanecer com energia mais alta e, portanto, indisponível às plantas. É a água que o solo retém quando o seu potencial mátrico se encontra abaixo do ponto de murcha permanente ($< - 1500$ kPa) (KLEIN, 1998).

Assim, o volume, o tamanho, a forma e o tipo de poros do solo, bem como a conectividade e a distribuição, afetam o movimento da água e do ar no solo. Essas características do espaço poroso são usadas para predição de atributos do solo (AMER et al., 2009; RODRIGUES et al., 2011).

2.4.1 Distribuição de poros

A porosidade de um solo é determinada de acordo com o arranjo, forma e tamanho das partículas sólidas que compõem o solo, ou seja, é determinada pela estruturação do solo. Esses sólidos podem ser minerais ou orgânicos, conferindo ao solo uma maior ou menor densidade (VAN LIER, 2020). Menores densidades do solo tendem a possuir um maior espaço poroso, entretanto essa propriedade pode variar, deste modo se torna importante o estudo da distribuição de poros por tamanho, visando caracterizar a estrutura do solo, sendo possível realizar a distinção de macro e microporos. Com este conhecimento é possível

estabelecer uma série de relações entre a quantidade de água e ar que podem preencher esses vazios, suas funcionalidades além da qualidade desse solo.

A estrutura e textura do solo definem o espaço poroso entre as partículas e a distribuição de tamanho de poros. Entretanto, a depender da mineralogia do solo presente, o comportamento físico hídrico entre solos com mesmo teor de argila pode ser distinto em função também da mineralogia, isto é, se é marcada pela influência de argilominerais 2:1, 1:1 ou óxidos de ferro e alumínio. Latossolos são normalmente argilosos, mas em função da forte microagregação granular conferida pela gibbsita, seu comportamento em termos de retenção de água assemelha-se a de um solo arenoso (TORMENA et al., 1998).

A matéria orgânica por sua vez contribui para o aumento da agregação do solo, favorecendo a formação de agregados maiores e mais estáveis em água (BORGES et al., 2015). A agregação influenciada pela matéria orgânica contribui para o arranjo de estrutura granular/grumosa e imprime maior porosidade entre agregados, favorecendo a formação de macroporos e conseqüentemente a infiltração de água. Nesse sentido, a matéria orgânica está mais relacionada à drenagem da água do que na sua retenção.

2.4.2 Fatores que podem afetar a distribuição de poros por tamanho

A macroporosidade é a primeira fração do sistema poroso afetada pelas atividades antrópicas (GIMENES, et al., 2013). Dessa forma, a avaliação da qualidade física do solo é de grande relevância na verificação da redução do volume de macroporos e mudanças na continuidade e distribuição dos poros com os diferentes manejos exercidos nos solos (DEXTER, 2004).

2.4.2.1 Sistemas de manejo

As modificações na estrutura do solo, ocasionadas pelas práticas de manejo, influenciam muitos parâmetros físicos nos quais utilizam medidas de volume do solo. Desta forma, a avaliação da distribuição do tamanho ou classe de poros tem permitido identificar diferenças entre sistemas de manejo do solo ou de culturas, com relação as condições físicas do solo. As práticas intensivas de manejo do solo tendem a alterar a distribuição de poros por tamanho, pois, o volume de macroporos pode ser reduzido ao passo que os microporos

tendem a aumentar ou permanecer inalterados (SILVA, et al., 2006; CUNHA et al., 2010; ARAÚJO, et al., 2011).

De acordo com os resultados obtidos por Araújo et al. (2011) em um latossolo, observaram que em mata nativa favoreceu maior volume total de poros nas profundidades de 0-3 cm e 10-13 cm, quando comparado ao solo com cafeeiros e submetido a diferentes sistemas de manejo com plantas invasoras. Este fato, está atrelado à ausência da ação antrópica, o que proporciona maior estabilidade estrutural, ausência de compactação do solo e conseqüentemente maior ocorrência de poros, favorecendo a maior capacidade de água disponível no solo (CAD) (KLEIN; LIBARDI, 2002; CUNHA et al., 2010; ARAÚJO, et al., 2011).

Em sistemas de cultivo, algumas plantas de cobertura podem proporcionar aumento da capacidade de água disponível no solo, bem como alterações na distribuição de poros no solo, pois como foi observado por Cunha et al. (2010), a crotalaria propiciou maior volume de poros na classe $< 0,15$ mm na camada de 10-20 cm, enquanto isto também pôde ser verificado na camada superficial utilizando o sorgo como cobertura.

A adoção de sistemas conservacionistas, como o plantio direto propicia aumento da capacidade de retenção de água, em função do aumento da mesoporosidade e do teor de matéria orgânica do solo, a qual possui maior capacidade de retenção de água, além de apresentar efeitos positivos na conservação das propriedades físico-hídricas do solo (MODEL, et al., 1995; BRADY; LIER, 2010).

Ao se considerar a distribuição de poros por tamanho, comparando este parâmetro físico sob diferentes sistemas de manejo, como o plantio convencional e de plantio direto, Bergamaschi, et al. (2009), observaram que houve diferença na distribuição de poros, onde, no plantio convencional, em função do revolvimento frequente nesse tipo de manejo, há ruptura da estrutura do solo, principalmente dos mesoporos, como consequência, há aumento de poros com tamanhos menores.

Em relação à água disponível no solo, Bergamashi, et al. (2009), verificou que a análise conjunta da disponibilidade de água às plantas entre os sistemas plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), mostrou que o solo em PD apresentou aproximadamente 60% mais água disponível que em PC; já a 30 cm de profundidade, o solo em PC teve cerca de 84% mais água disponível que em PD mas, considerando-se a camada entre 0 e 30 cm de profundidade, o solo em PC apresentou mais água disponível às plantas (± 45 mm) que em PD (± 35 mm).

Carpedo e Mielniczuck (1990), discutiram em seu trabalho, que a maior armazenagem e disponibilidade de água às plantas em sistema de plantio direto, está associada a maior estruturação do solo das primeiras camadas do perfil, pois, segundo os autores, a matéria orgânica influencia a mesoporosidade e redução dos limites de capacidade e ponto de murcha permanente.

Sendo assim, plantas cultivadas em PD absorvem água do solo com maior facilidade em relação às aquelas em PC, principalmente em condições de alta evapotranspiração, pois, como no PD apresentou poros de maior tamanho, houve menor força de atração, deixando a água mais livre e disponível às plantas (BIANCHI, et al., 2007).

O não revolvimento do sistema de plantio direto, ocasiona surgimento de bioporos, tornando a porosidade mais eficiente no transporte e aeração para o sistema radicular das plantas em relação ao plantio convencional, devido à manutenção dos poros, na qual é desestruturada no solo quando há revolvimento (DALMAGO, 2009).

Santos et al. (2007) e Sarmento et al. (2008) constataram que mais da metade da massa de raízes de espécies de braquiária e de colônio concentra-se na camada de 0-0,10 m do solo. Desta forma, a adoção desses tipos de consórcio, propiciam o maior incremento da macroporosidade do solo e redução da densidade do solo.

Klein et al. (2002), comparando uma área de mata com um solo sob sistema de manejo irrigado, perceberam que a distribuição do tamanho de poros promoveu alteração em função do tipo de manejo adotado. Diante disso, os autores concluíram que o manejo do solo irrigado aumentou a densidade do solo até à profundidade de 40 cm, diminuiu a porosidade total e alterou a distribuição do diâmetro dos poros, acarretando a conseqüente diminuição do volume de macroporos e aumento do de micro e criptoporos.

Perusso, et al., (2019), observaram que a distribuição de poros por tamanho em um Latossolo vermelho em sistema integrado de produção agropecuária, foram alterados de acordo com o cultivo de soja e milho nesses sistemas. Onde, a cultura do milho, propiciou maior valor de microporos em relação aos macroporos, enquanto que a soja, demonstrou um maior incremento nos macroporos e menor microporos. Com isso, o autor ressalta que a distribuição de poros no solo, é afetada pelo tipo de cultura adotada.

Silva et al. (2017), ressaltam que o fato do manejo do solo cultivado com milho ter apresentado maior quantidade de microporos em sua estrutura, deve estar relacionado ao aumento da densidade do solo e, conseqüentemente, de microporos que retém água em potenciais matriciais inferiores a -1500 kPa.

2.4.2.2 Alteração da densidade do solo

A densidade do solo é afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros. Essas alterações influem nas propriedades físico-hídricas importantes, tais como: a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração, tudo isso em função da diminuição da macroporosidade (SILVA; KATO,1997; TORMENA et al., 1998; KLEIN; LIBARDI, 2002).

De acordo com Klein e Libardi (2002), diferentes sistemas de uso manejo do solo, foram capazes de alterar a densidade do solo, o que contribuiu para menor umidade na saturação e maior ponto de murcha permanente. Essas alterações, podem interferir na disponibilidade de água às plantas, pois maiores valores de umidade próximos à saturação significam água facilmente drenável. Em relação ao ponto de murcha permanente, indicam uma preocupação, pois quanto maiores os valores de D_s , indicam água indisponível às plantas (KLEIN e LIBARDI, 2002).

Em áreas de mata, mesmo na ausência de atividades antrópicas, ou seja, sem alteração da densidade, a distribuição de macro e microporos também pode ser afetada, mas de forma natural, como foi observado por Klein e Libardi (2002), onde constaram uma tendência de aumento de microporos e redução de macroporos em decorrência do arranjo desses agregados e da atividade biológica exercida na camada mais superficial.

2.5 ESTABILIDADE DE AGREGADOS

A estrutura é uma das propriedades mais importantes do solo, e refere-se à disposição espacial em pequenos, médios e grandes espaços porosos, resultantes da organização de cada uma das partículas de areia, silte, argila que compõem o solo, assim como seus agregados (REINERT; REICHERT, 2006). Em outras palavras, refere-se à organização de partículas e agregados dentro do perfil do solo. O agregado representa um conjunto de partículas primárias do solo com forma e tamanho definidos, comportando-se mecanicamente como uma unidade estrutural (PALMEIRA et al., 1999).

Para Hernandez et al. (2009), estrutura é a propriedade que a massa do solo tem de si dividir em frações de diferentes formas e tamanhos chamados agregados. Os agregados

constituem-se em um conjunto de partículas do solo com forma e tamanho definidos, comportando-se como uma unidade estrutural (BOCHNER et al., 2008).

A formação de agregados no solo ocorre, de maneira geral, em duas etapas: a primeira corresponde a aproximação das partículas do solo, decorrente das variações do conteúdo de água, favorecida pelos ciclos de umedecimento e secagem, pela ação mecânica das raízes e hifas de fungos ou pela atração eletrostática entre as partículas de solo (BOCHNER et al., 2008). A segunda etapa refere-se à estabilização, ou seja, à consolidação da união entre as partículas do solo pela ação cimentante dos polímeros orgânicos da matéria orgânica do solo e dos exsudados orgânicos liberados pelas raízes de plantas, em função das ligações com a superfície das partículas minerais do solo por meio de cátions polivalentes (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998; MIELNICZUK, 1999).

Para a formação do agregado, é necessário que os colóides do solo se encontrem floculados e que todos os componentes do agregado sejam posteriormente estabilizados por algum agente cimentante (HILLEL et al., 1980). Os agentes cimentantes são formados, principalmente, por compostos orgânicos que são produtos da decomposição de vegetais e outros resíduos orgânicos no solo e de exsudatos dos organismos (SILVA et al., 2015). O agrupamento dos agregados do solo, organizados numa forma geométrica definida, constitui a estrutura do solo (CAPECHE, 2008).

Diversos são os fatores que interferem na agregação do solo. Dentre esses, os principais são: tipo e teor de argila, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxidos e hidróxidos de ferro, alumínio e manganês, exsudatos orgânicos de plantas, substâncias orgânicas provenientes da ação de microrganismos e outros compostos orgânicos (BASTOS et al., 2005). A matéria orgânica, os óxidos e os hidróxidos são agentes cimentantes, tanto das partículas primárias quanto das partículas secundárias do solo. Podem-se incluir, também, os ciclos de umedecimento e secagem como importante fator ambiental que interfere na agregação do solo (CARVALHO, 1991; MALTONI, 1994).

A matéria orgânica, funcionando como agente cimentante do solo, tem sido foco de vários trabalhos (MIYAZAWA; BARBOSA, 2011; SILVA et al., 2014). O aumento da estabilidade dos agregados está intimamente relacionado com a capacidade da matéria orgânica de se aderir às partículas minerais do solo, formando as ligações argilo-metal-húmicas (EDWARDS; BREMNER, 1967).

Os agentes orgânicos envolvidos na estabilização dos agregados do solo podem ser divididos em três grupos, quanto a sua resistência à ação microbiana: os transicionais, os

temporários e os persistentes. Os primeiros são os polissacarídeos que são rapidamente decompostos pelos microrganismos (ANGERS; MEHUYS, 1989) e, normalmente, estão associados à estabilidade dos macroagregados do solo. Os agentes temporários são as hifas de fungos e raízes, que permanecem no solo por semanas, meses ou até anos, estão associados aos macroagregados. As raízes podem apresentar ação mecânica, promovendo pressão nos constituintes do solo, e química por meio das secreções e exudados. Os agentes persistentes são os materiais orgânicos humificados, principalmente associados aos óxidos de Fe e Al de baixa cristalinidade, constituindo a parte mais importante na formação de microagregados do solo (TISDALL; OADES, 1982).

As modificações que ocorrem nas estruturas dos solos agrícolas em razão do uso e do manejo inadequados são importantes para a escolha de sistemas que priorizem a conservação das propriedades dos solos e aumentem o potencial produtor dessas áreas (ROZANE et al., 2010). Assim, quando exposto a cultivos intensivos, a sistemas de manejo inadequados e ao uso de implementos agrícolas pesados, o solo pode perder ou ter sua estrutura original alterada contribuindo para a formação de camadas compactadas que provocam redução no volume dos poros e aumentam a densidade do solo causando mudanças na estabilidade dos agregados do solo (MARIA et al., 2007).

2.6 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, durante a qual ocorre um aumento da densidade, em consequência da redução de volume pela expulsão do ar (DIAS JUNIOR; PIERCE, 1996). A compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (SMUCKER; ERICKSON, 1989) resultando em decréscimo da produção e aumento da erosão (SOANE, 1990).

Dentre os atributos físicos, podem ocorrer aumento da densidade do solo (RESENDE SILVA, et al., 2011), diminuição da macroporosidade e condutividade hidráulica (SUZUKI et al., 2007) e alterações na relação entre macroporosidade e microporosidade (Silva et al., 2006). Esses atributos são importantes indicadores físicos de qualidade, pois fornecem informações relacionadas aos processos do solo, como dinâmicas de água e de nutrientes, em função do manejo adotado no cultivo agrícola ou do seu comportamento sob vegetação nativa (AMPOORTER et al., 2010).

A umidade do solo é o fator mais importante que influencia o processo de compactação (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994). Nesse processo, a aplicação de uma pressão faz com que as partículas do solo deslizem, causando um rearranjo das partículas e aumento da densidade. Nessa ocasião, a água funciona como lubrificante das partículas, facilitando o rearranjo (REICHERT et al., 2010). Sob a aplicação de pressões ao solo, a densidade do solo aumenta até um determinado valor de umidade, chamada de umidade ótima ou crítica de compactação, a partir do qual incrementos na umidade resultam em decréscimo da densidade do solo visto que, o solo se torna cada vez mais plástico e incompressível (ISHAQ et al., 2001; HAMZA; ANDERSON, 2005). O conhecimento da umidade em relação a compactação do solo pode ser útil na programação das operações mecânicas de rotina (BATEY, 2009).

O manejo do solo provoca alterações na estrutura, o que é evidenciado pelo aumento da densidade do solo e a redução na macroporosidade, acarretando menor taxa de infiltração de água e aumento do deflúvio. A degradação do solo, com a conseqüente queda de produção, está diretamente relacionada com as práticas que promovem a alteração da sua estrutura (VIEIRA, 1985).

A susceptibilidade dos solos à compactação varia com a textura. Solos siltosos com baixo conteúdo de colóides são mais suscetíveis que os solos de textura média ou argilosos com baixo teor de água, enquanto os solos arenosos são ligeiramente suscetíveis a compactação (HORN et al., 1995). Incrementos na matéria orgânica do solo pode reduzir a compacidade por aumentar a resistência a deformação e/ou a elasticidade do solo, conhecido como efeito rebote (SOANE, 1990). Altos teores de carbono orgânico podem reduzir a susceptibilidade à compactação, mesmo em altos níveis de umidade, de solos argilosos e franco argilosos (SMITH et al., 1997).

Todavia, podem ocorrer variações nos valores destes atributos (densidade do solo, porosidade, macroporosidade e microporosidade), a depender da composição granulométrica do solo e, seu valor absoluto não pode ser comparado entre solos com diferentes texturas (STOLF et al., 2011), dificultando, muitas vezes, a comparação entre sistemas de manejo do solo. Por exemplo, Reichert et al. (2003) propuseram valores de densidade do solo crítica para o crescimento radicular em algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 Mg m⁻³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Mg m⁻³ para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Mg m⁻³ para os franco-arenosos, indicando que a classe textural tem relação direta com o valor de densidade. Como a textura

influencia o processo de estruturação do solo, também tem relação direta com a porosidade e a distribuição dos tamanhos de poros.

Em estudos realizados por Kondo e Dias Junior (1999) demonstrou-se que, caso sejam aplicadas aos solos pressões maiores do que a sua capacidade de suporte de carga, a compactação ocorre, mesmo que o tráfego se dê na zona de friabilidade. Assim sendo, o entendimento do comportamento compressivo do solo utilizando a pressão de pré-consolidação adquire grande importância em razão de ser esta a base, do ponto de vista físico, para a tomada de decisão do manejo mais adequado, reduzindo os efeitos prejudiciais originados pelo processo de compactação.

2.7 PRESSÃO DE PRÉ-CONSOLIDAÇÃO

O tráfego intenso nas áreas de cultura é o principal responsável pela compactação provocadas por forças mecânicas, tanto pelo excesso de operações ou pelo fato do maquinário e implementos agrícolas aplicarem pressões maiores do que a capacidade de suporte de carga do solo (VEIGA et al., 2007). Nota-se que a profundidade de compactação é distinta com relação ao tipo da máquina e seus rodados, condições do solo e frequência de tráfego (REICHERT et al., 2007).

Nos últimos anos com o crescimento da agricultura e das técnicas de precisão, a utilização de maquinário e implementos modernos, tendo uma maior potência e um maior peso, têm levado técnicos e pesquisadores da ciência do solo a desenvolver novos procedimentos de análise, propondo assim a inserção de atributos mecânicos e dinâmicos em estudos de avaliação da estrutura dos solos agrícolas e florestais (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1995; PENG et al., 2004; ARAUJO-JUNIOR et al., 2008; SILVA et al., 2010; PAIS et al., 2011; IORI et al., 2012; PIRES et al., 2012). Iniciativas como essas têm feito da modelagem e da predição da Capacidade de Suporte de Carga do Solo (CSCS) uma proposta viável e exequível, mesmo que ainda praticada por um grupo restrito de pesquisadores no Brasil (SILVA et al., 2003; SEVERIANO et al., 2008; IORI et al., 2013; DIAS JÚNIOR et al., 2005; ARAUJO-JUNIOR et al., 2011; PAIS et al., 2013).

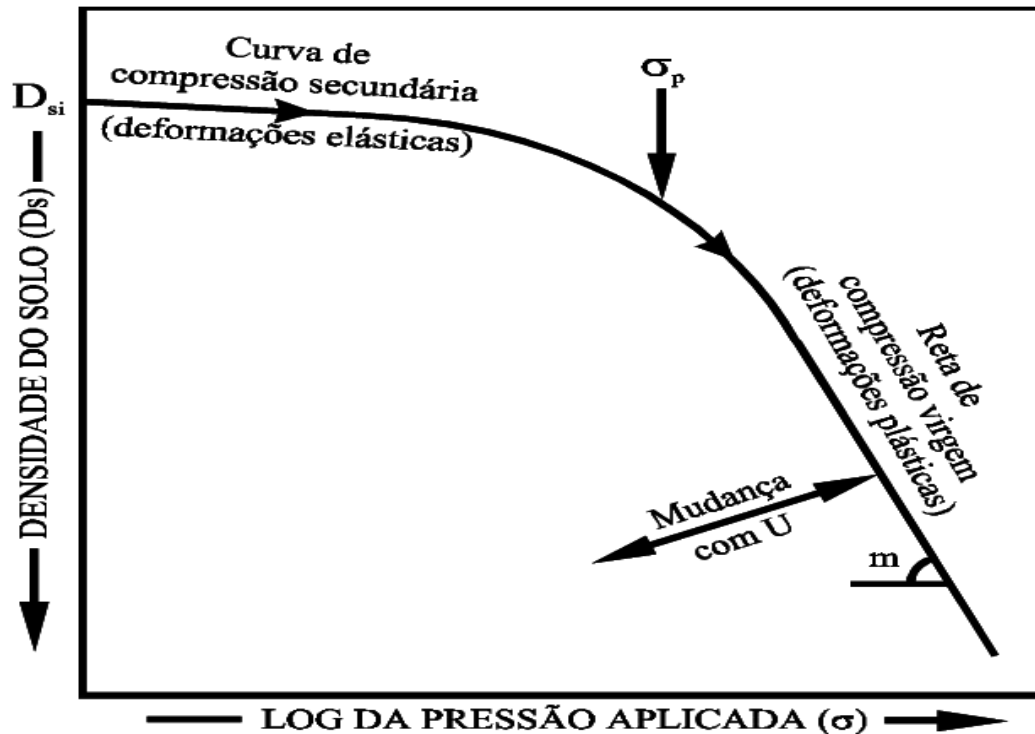
A aplicação de modelos de CSCS permite prever as consequências do tráfego sobre a estrutura do solo, através da utilização da pressão de pré-consolidação (σ_p) (KAMIMURA et al., 2012; AJAYI et al., 2013; MARTINS et al., 2013). A pressão de pré-consolidação é uma propriedade mecânica do solo determinada em laboratório, sendo indicadora da pressão

máxima que pode ser aplicada ao solo de maneira a não compactar o mesmo (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1996).

A pressão de pré-consolidação (σ_p) tem se revelado uma alternativa essencial, pois foi definida por Dias Júnior (1994), como um indicador da máxima pressão aplicada ao solo anteriormente e um indicador de vulnerabilidade do solo à compactação. A importância da compreensão da pressão de pré-consolidação é largamente reconhecida, por auxiliar na introdução de sistemas conservacionistas de manejo (RÖMKENS e MILLER, 1971). Oliveira et al. (2003) e Silva et al. (2010) demonstram a importância do emprego de informações sobre a pressão de pré-consolidação para o manejo racional, por permitir a predição do comportamento compressivo do solo. A utilização do ensaio de compressão uniaxial vem sendo amplamente utilizada na avaliação dos diversos efeitos da compactação do solo (DIAS JÚNIOR e PIERCE, 1995; SILVA et al., 2003; ARAÚJO-JÚNIOR et al., 2008; AJAYI et al., 2010; SEVERIANO et al., 2010), sendo considerado, portanto, um método muito difundido (DIAS JÚNIOR et al., 2004).

O ensaio de compressão uniaxial basicamente consiste em aplicar sucessivas e continuamente pressões crescentes e preestabelecidas (12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800 e 1600 kPa) em amostras de solos parcialmente saturadas (DIAS JÚNIOR, 2000). A partir desse ensaio tem-se a curva de compressão do solo, que é representada por um gráfico no qual são representados, no eixo das abscissas, os valores das pressões aplicadas (σ) em escala logarítmica e, no eixo das ordenadas, os valores da densidade do solo ou do índice de vazios em escala natural. Baseando se nessa curva é possível determinar a pressão de pré-consolidação (σ_p), o índice de compressão (IC) e o índice de recompressão (CR). O IC é a relação entre a variação da D_s ou do índice de vazios e a variação do log da σ , em qualquer parte da linha de compressão virgem, representando sua inclinação: $IC = -(E_2 - E_1)/\log(\sigma_2/\sigma_1)$, em que σ_2 e σ_1 correspondem a um intervalo de pressões aplicada em qualquer parte do seguimento da reta virgem. O CR é a razão entre a variação da D_s ou do índice de vazios da linha de compressão secundária e o log da σ_p , representando a inclinação da linha de compressão secundária: $CR = -(E_{\sigma_p} - E_i)/\log(\sigma_p)$ (REINERT et al., 2003).

Figura 1. Curva de compressão do solo.



Fonte: DIAS JÚNIOR, 1994.

A pressão de pré-consolidação separa a curva de compressão do solo em duas regiões: região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis (curva de compressão secundária) e região de deformações plásticas e não recuperáveis (curva de compressão virgem), como demonstrado na Figura 1. Nos solos agrícolas e florestais, devem ser evitadas aplicações de pressões maiores do que a pressão de pré-consolidação (maior pressão aplicada anteriormente), evitando assim a ocorrência da compactação (GUPTA et al., 1989; LEBERT; HORN, 1991).

Por depender do volume de água, a σ_p varia em função da umidade do solo. Quanto menores os teores de água, mais resistente e densa fica a matriz do solo, levando uma maior resistência às deformações ocasionadas por pressões externas. A pressão de pré-consolidação torna-se maior à medida que o solo fica mais seco. Isso ocorre, pois, a água vem atuando com duas formas sobre a resistência do solo ao cisalhamento: a) diminui a coesão entre as partículas sólidas e b) forma filmes sobre as partículas sólidas, reduzindo o atrito entre elas. O resultado é um decréscimo exponencial da pressão de pré-consolidação com o aumento da umidade (HILLEL, 1980).

A pressão de pré-consolidação equivale à capacidade de suporte de carga de solos, se torna importante para a análise do comportamento da curva de compressão em diferentes

sistemas de manejo, permitindo assim avaliar a susceptibilidade do solo à deformação e, conseqüentemente, à compactação (KONDO e DIAS JÚNIOR, 1999).

Determinados solos têm maior capacidade de suportar cargas, são mais facilmente manejados após períodos de chuva e não têm limitações ao crescimento vegetal (REINERT, 1990). A diferenciação entre tipos de solo se deve aos diferentes estados de agregação, à textura, ao teor de água, à matéria orgânica e às tensões que o solo recebeu no passado (HORN; LEBERT, 1994). Os atributos do solo que influenciam seu comportamento compressivo, são afetadas pelo manejo, tais como: matéria orgânica (STONE e EKWUE, 1995), estrutura (HORN et al., 1995), teor de água e densidade do solo (REINERT, 1990; DIAS JUNIOR, 1994; KONDO e DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA et al., 2002).

2.8 MECANISMOS DE RETENÇÃO DE ÁGUA

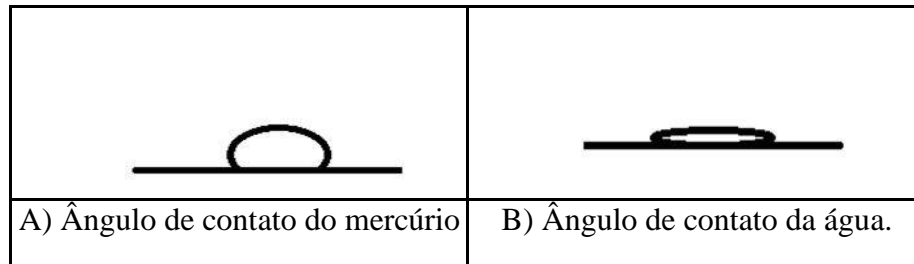
Quando o espaço poroso do solo está ocupado com um conteúdo de água, dois processos ocorrem para a retenção da água no solo, são eles a adsorção e a capilaridade.

Na adsorção, três mecanismos principais ocorrem: os grupos de oxigênio e oxidrilas ao redor das argilas deixam a sua superfície com cargas negativas, e por isso atraem a molécula dipolar da água; a molécula de água, com cargas negativas no oxigênio se atraem a cátions trocáveis na superfície da argila; ainda, a molécula de água é atraída para a superfície da matriz do solo por forças de van der Waals, que são forças de curto alcance, e uma camada muito fina de água pode ser adsorvida dessa forma à superfície dos sólidos do solo (VAN LIER, 2020).

Na retenção de água no solo por capilaridade, a água consegue ter uma ascensão capilar, isso é, subir dos poros do solo contra a ação da gravidade – por conta da tensão superficial da água e pela adesão das moléculas de água com as partículas do solo. A tensão superficial da água ocorre pela atração das moléculas de água umas pelas outras por meio das forças de van der Waals, ou forças de coesão (VAN LIER, 2020).

A força de coesão é a atração entre moléculas iguais (por exemplo, H₂O atraindo H₂O), enquanto a força de adesão é a atração entre moléculas distintas (entre a água e partículas do solo, por exemplo). Comparando as forças de adesão e coesão do mercúrio e da água com a superfície de um vidro, na água em vidro predominam as forças de adesão, enquanto no mercúrio predominam as forças de coesão (Figura 2).

Figura 2. Forças de coesão e adesão do mercúrio e da água.



A ascensão de um líquido em um tubo capilar pode ser calculada com a Equação 1.

$$h = \frac{2T \cos \alpha}{\rho_a g r} \quad (1)$$

onde:

h = altura da ascensão capilar;

T = tensão superficial do líquido;

α = ângulo de contato;

ρ_a = densidade da água;

g = aceleração da gravidade;

r = raio do tubo capilar.

Outra forma de calcular a ascensão capilar é por meio da Equação 2:

$$h = \frac{0,3}{d} \quad (2)$$

onde:

d = diâmetro do tubo capilar.

2.9 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA

A curva de retenção de água no solo (CRA) é uma relação entre o potencial matricial do solo e o conteúdo de água no solo, e por meio da CRA é possível avaliar a distribuição do tamanho de poros do solo. Além disso, são utilizadas para determinar a capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e a capacidade de água disponível para as plantas (CAD), e podem ser utilizadas como indicadores da qualidade física do solo (SILVA et al., 2017).

Utilizando a CRA, a capacidade de campo pode ser definida nos valores de 4, 6, 10 ou 33 kPa, dependendo do solo, como também pode ser estimada no ponto de inflexão da

CRA (ANDRADE; STONE, 2010). Os valores de água no ponto de murcha permanente são estimados em 1.500 kPa (SILVA et al., 2014).

Os aparelhos tradicionais para a obtenção da CRA no solo são o funil de placa porosa e as câmaras de pressão ou câmara de Richards. O funil de placa porosa ou funil de Buchner é utilizado normalmente com altura h menor do que 2m, sendo que quanto maior o valor de h , maior tensão será aplicada às amostras de solo. Quando se aplica uma altura h , todos os poros do solo com raio maior do que os da Equação 3 são esvaziados (VAN LIER, 2020).

$$r = 2T/\rho_a g h \quad (3)$$

onde:

r = raio do tubo capilar.

T = tensão superficial do líquido;

ρ_a = densidade da água;

g = aceleração da gravidade;

h = altura da ascensão capilar;

As câmaras de Richards são utilizadas para aplicar tensão de 2m de coluna d'água até 150m. Quando uma amostra é colocada em determinada pressão, toda água do solo que estiver retida a uma pressão inferior à da câmara de Richards será retirada do solo, por isso ocorre o gotejamento pelo tubo de saída, quando o gotejamento cessa, a amostra atinge o equilíbrio.

Os procedimentos para utilizar o funil de placa porosa ou a câmara de Richards são: saturar a amostra de solo, pesar a amostra saturada, levar para o funil de placa porosa ou para a câmara de Richards escolhendo a pressão a ser utilizada, e depois pesar novamente a amostra quando esta atingir o equilíbrio para encontrar o valor do conteúdo de água que restou na amostra (VAN LIER, 2020).

Além do funil de placa porosa e da câmara de Richards, outros métodos e equipamentos podem ser utilizados para a determinação da CRA, como: mesa de tensão, células Temp, sensor Time Domain Reflectometry (TDR), Psicrômetro de Termopar (TAVARES et al., 2008) e o método de Arya e Paris (NASCIMENTO et al., 2010).

Tavares et al. (2008) compararam a curva de retenção obtida por câmara de Richards e com dois sensores TDR, e verificaram que os equipamentos TDR forneceram dados que puderam ser comparados aos dados obtidos pela câmara de Richards, obtendo índices de

desempenho $C > 0,85$, e também trouxeram resultados mais rápidos do que os obtidos por meio da câmara de Richards.

Nascimento et al. (2010) compararam os métodos da centrífuga, câmara de Richards e o de Arya & Paris (AP), e encontraram que o método AP obteve valores de conteúdo de água superiores aos métodos da centrífuga e da câmara de Richards, concluindo que o método AP é interessante de ser aplicado por ser mais rápido, mas esse método precisa de calibração.

As curvas de retenção de água no solo são influenciadas pelo manejo (macroporos) e por características intrínsecas do solo, como textura e mineralogia (SILVA et al., 2017). Além disso, foi constatado por Silva et al. (2014) que o uso de amostras com estrutura deformada e indeformada diferem entre si no conteúdo de água, além disso, verificaram que os valores do conteúdo de água no ponto de murcha permanente (PMP) obtidos com o psicrômetro WP4-T foram superiores aos valores obtidos com a câmara de Richards.

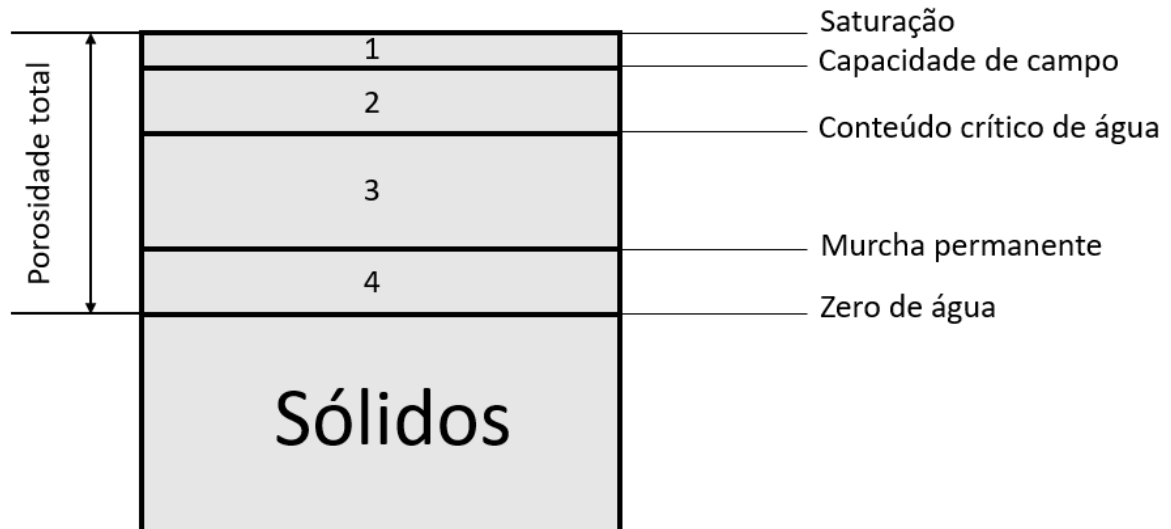
2.10 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA A PLANTA

A quantidade de água contida em uma unidade de massa ou volume de solo e o estado de energia da água no solo são fatores fundamentais que afetam diretamente o crescimento das plantas (HILLEL, 1982; HILLEL, 1998). A facilidade que as raízes têm de extrair a água do solo não é suficiente para tornar a água disponível para às plantas, depende também da permanência da água na zona radicular (VAN LIER, 2010).

As interações entre o solo e a água determinam as taxas de perda de solo por lixiviação, escoamento superficial, equilíbrio entre o ar e a água nos poros, taxa de mudança na temperatura do solo, a taxa dos organismos do solo, além de armazenarem e fornecerem água para as plantas (BRADY; WEIL, 2013). O conteúdo de água também influencia o conteúdo de ar e as trocas gasosas do solo, estes influenciando diretamente a respiração das raízes, a atividade dos microrganismos e o estado químico do solo (HILLEL, 1982).

A disponibilidade de água às plantas é definida por quatro faixas entre determinados pontos de conteúdo de água, são elas: 1) solo muito úmido; 2) solo úmido; 3) solo seco, e; 4) solo muito seco (Figura 3).

Figura 3. Representação esquemática do solo como reservatório de água, indicando as faixas de conteúdo de água e os seus limites.



Fonte: VAN LIER, 2020.

Van Lier (2010) descreve as quatro fases como:

- solo muito úmido, condição que o solo apresenta elevada condutividade hidráulica e por consequência, a água encontra-se disponível para as plantas, porém boa parte da água é drenada em pouco tempo para fora do solo, reduzindo o tempo de permanência da água nas raízes;
- solo úmido, a condutividade hidráulica reduz e assim, desacelera o processo de drenagem, porém ocorre a absorção de água pelas raízes à velocidade que acompanha a transpiração potencial;
- solo seco, a condutividade hidráulica se torna fator limitante para a extração de água pelas raízes, nesse estágio a planta fecha seus estômatos para reduzir o fluxo de água e evitar o murchamento. Nesta situação a água está disponível às plantas, porém a taxa de extração é inferior à demanda atmosférica, e;
- solo muito seco, condutividade hidráulica do solo muito baixa, de maneira que a planta necessita de gradientes muito altos de potencial para extrair água. Neste caso, a água está indisponível. Mas, vale ressaltar que a disponibilidade da água às plantas não é dependente apenas da facilidade que as raízes têm de extraí-la do solo, mas sim da permanência dessa água na zona radicular.

2.10.1 Capacidade De Campo (CC)

A capacidade de campo (CC), também conhecida como o limite superior de disponibilidade de água, é um processo dinâmico importante nos processos de armazenagem e disponibilidade de água para as plantas. A CC é fortemente correlacionada com o fluxo de drenagem, a condutividade hidráulica e potencial total da água no solo (ANDRADE; STONE, 2011).

Corresponde à propriedade que todos os solos possuem de manter determinada quantidade de água distribuída em seus poros em uma relação de equilíbrio com a força da gravidade (LEPSCH, 2010). Refere-se ao estado hídrico de um solo e a sua determinação depende das camadas sobre e subjacentes da avaliada (VAN LIER, 2020).

A CC diz respeito a um grau aproximado de umidade do solo no qual diversas propriedades estão em transição, Brady e Weil (2013) cita os momentos da CC: 1) um solo está retendo a máxima quantidade de água disponível às plantas; 2) o solo está perto de seu limite inferior de plasticidade, de maneira que o solo irá se comportar como um semi-sólido friável quando a umidade está abaixo da CC e, quando está acima da CC, se torna uma massa muito plástica. Desta forma, no ponto de CC o solo se aproxima da umidade ideal para facilitar o preparo do solo, e; 3) os macroporos permanece cheio de ar, em quantidade suficiente de uma boa aeração, permitindo a atividade microbiana aeróbica e crescimento de raízes.

2.10.2 Ponto De Murcha Permanente

Como o próprio termo sugere, o PMP corresponde a tensão na qual as plantas murcham permanentemente, ou seja, mesmo que seja fornecido água, elas não são mais capazes de se recuperar (LEPSCH, 2010). O valor de tensão convencionado para o PMP é o de 1.500 kPa, valendo ressaltar que, tal valor é utilizado visando facilitar o entendimento prático, porém tal valor varia de acordo com a espécie vegetal e seu estágio fenológico (KLEIN; REICHERT; REINERT, 2006).

2.10.3 Capacidade De Água Disponível (CAD)

A capacidade de água disponível (CAD), ainda que questionada na literatura, é utilizada como indicador de qualidade física do solo, sendo este o conteúdo de água existente entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), e indica a capacidade do solo em disponibilizar água para plantas (REYNOLDS et al., 2009; TORMENA et al., 1999). O PMP é o conteúdo de água no qual as plantas não conseguem extrair mais água do solo, e corresponde a umidade retida no solo quando submetido ao potencial matricial de -1500 kPa. A definição do valor de potencial matricial para obtenção da CC depende dentre outros fatores, do clima e da profundidade do lençol freático, porém usualmente tem sido utilizados os valores de -6 kPa e -10kPa para Latossolos argilosos oxídicos e solos tropicais (DEXTER; BIRD, 2001; SILVA et al., 2015; TOPP et al., 1997), além de proposta a estimativa pela umidade referente ao ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo (FERREIRA; MARCOS, 1983; DEXTER; BIRD, 2001).

Embora a CAD seja frequentemente considerada como intervalo “ideal” para o crescimento e funções do sistema radicular (REYNOLDS et al., 2009), em solos submetidos ao manejo esse parâmetro é geralmente pouco sensível às alterações estruturais que ocorrem no solo, por não levar em consideração limitações físicas que podem surgir, como exemplo a compactação. Com a diminuição da porosidade total do solo, algumas vezes o conteúdo de água na CC e no PMP sofrem alterações proporcionais, não alterando significativamente o valor da CAD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSI, W. M. V. et al. Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 2, p. 134–140, 2019.
- ANDRADE, R. D. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111-116. 2011.
- ANGERS, D.A.; MEHUYS, G.R. Effects of cropping on carbohydrate content and water stable aggregation of a clay soil. **Can. J. Soil Sci.**, 69:373-380, 1989.
- APGAUA, D. M. G. et al. Beta-diversity in seasonally dry tropical forests (SDTF) in the Caatinga Biogeographic Domain, Brazil, and its implications for conservation. **Biodiversity and Conservation**, vol. 23, n. 1, p. 217–232, jan. 2014.
- APGAUA, D.M., ISHIDA, F.Y., TNG, D.Y.P. et al. (2015) Functional traits and water transport strategies in lowland tropical rainforest trees. **PLoS ONE**, 10, e0130799.
- ARAGÓN, A.; GARCIA, M.G.; FILGUEIRA, R.R.; PACHEPSKY, Y.A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test: the relationship with organic carbon and water content. **Soil and Tillage Research**, v. 56, n. 3, p. 197-204, 2000.
- ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.C.; ALCÂNTARA, E.N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2011;35:115-31.
- ARAÚJO-JUNIOR, C.F.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008;32:23-32.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J; HUNTER, E.A. Soil compactability in relation to physical and organic properties in 156 locations in the UK. **Soil Tillage Res.**, 57 (2000) , pp. 83 – 91
- BASTOS, R.S.; MENDONÇA, E.S.; ALVAREZ, V.H.; CORRÊA, M.M.; COSTA, L.M. Formação e estabilização de agregados do solo influenciados por ciclos de umedecimento e secagem após adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. s/n, p.21-31, 2005.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management – a review. **Soil Use Manage**. 25, 335-345, 2009.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R. Soil structure: Evaluation and agricultural significance. In: BAVAR, L.D.; GARDNER, W.H. & GARDNER, W.R., eds. **Soil physics**. 4.ed. New York, J. Wiley, 1972. p.178-223.
- BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, n. 2, p. 116-127, 2015.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:842-849, 2005.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: Klute A. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. Madison: ASA/SSSA, 1986. p. 363-375.

BOCHNER, J.K.; FERNANDES, M.M.; PEREIRA, M.G.; BALIEIRO, F.C.; SANTANA, I.K.S. Matéria Orgânica e agregação de um planossolo sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 46-53, mar. 2008.

BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 46, p. 1-37, 1991.

BRADY, N. C.; WEIL, R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. 3ª Edição [Tradução técnica: Igo Fernando Lepsch]. Porto Alegre: Bookman, 2013.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: USP/EESC, 1998.

BULLOCK, P. et al. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publications, 1985. 152 p.

CAPECHE, C.L. Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista. Embrapa Solos. **Comunicado Técnico**, 2008.

CARDUCCI, C. E. et al. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 270–278, 2014.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; OLIVEIRA, L. M.; BARBOSA, S. M.; SILVA, E. A. Retenção de água do solo sob sistema conservacionista de manejo com diferentes doses de gesso. **Revista Ciências Agrárias**, v. 58, p. 284- 291, 2015.

CARVALHO, A.F. Emprego da agitação horizontal na avaliação da estabilidade de agregados de cinco solos da região sudeste. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 73p. (**Tese de doutorado**).

CARVALHO, F. G. et al. Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, v. 12, n. 2, p. 9–16, 2017.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. s/n, p. 527-538, jun. 1998.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - (CONAB). ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA - CAFÉ. **Observatório Agrícola**, v. 6, n. 4, p. 1–45, 2020.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C.; GARRIDO, J. M., et al.; Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2009.

COSTA, M.J.; ROSA JÚNIOR, E.J.; ROSA, Y.B.C.J.; DE SOUZA, L.C.F.; ROSA, C.B.J. Chemical and physical attributes of a latosol being influenced by soil management and gessing effect. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Bot. Bras.**, São Paulo , v. 20, n. 1, p. 13-23, Mar. 2006 .

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D. Atributos físicos do solo sob diferentes preparos e coberturas influenciados pela distribuição de poros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14(11), 1160-1169, 2010.

DAM, R.F.; MEHDI, B.B.; BURGESS, M.S.E.; MADRAMOOTOO, C.A.; MEHUYS G.R.; CALLUM, I.R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, v. 84, n. 1, p. 41-53, 2005.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 6 ed.** California:Cengage Learning, 2011.

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:703-709, 1999.

DEPERON, M. A. et al. Influência de implementos de preparo e de níveis de compactação sobre atributos físicos do solo e aspectos agronômicos da cultura do milho. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 2, p. 367–376, 2016.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v. 57, n. 4, p. 203–212, 2001.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v.120, p.201-214, 2004.

DIAS JUNIOR, M.S. **Compactação do solo**. Tópicos em ciência do solo, Viçosa, v. I, p. 56-94, 2000.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compression of three soils under longterm tillage and wheel traffic. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. **(Tese de Doutorado)**

DIAS JUNIOR, M.S.; CRISTINA, P.C.C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília, Produção de informação, p.153 – 172, 2017.

DIAS JÚNIOR, M.S.; LEITE, F.P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAUJO-JÚNIOR, C.F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Sci Agric**. 2005;62:248-55.

DIAS JÚNIOR, M.S.; MIRANDA, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 24, n. 2, p. 337-346, 2000.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technol**. 1995;8:139-51.

DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 1996;20:175-82.

DIAS JÚNIOR, M.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S. & LEITE, F.P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:805-810, 2004.

DIAS, L. de O.; SILVA, M. dos S. da. Determinantes da demanda internacional por café brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, v. 24, n. 1, 24 mar. 2015. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/969>.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. **Methods for Assessing Soil Quality**, p. 25–37, 1996.

EDWARDS, A.P. & BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. **J. Soil Sci.**, 18:64-73, 1967.

EGUCHI, E. S.; SILVA, E. L. D.; OLIVEIRA, M. S. Variabilidade espacial da textura e da densidade de partículas em um solo aluvial no Município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 242-246, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, 2017. 574p.

FERNÁNDEZ, P. L.; ALVAREZ, C. R.; SCHINDLER, V.; TABOADA, M. A. Changes in topsoil bulk density after grazing crop residues under no-till farming. **Geoderma**, v.159, p.24-30, 2010.

FERREIRA JÚNIOR, L. DE G. et al. Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastas derriçadoras. **Ciencia Rural**, v. 46, n. 2, p. 273–278, 2016.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 507–514, 1999.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, v.7, p.96-101, 1983.

FERREIRA, M.M. **Caracterização física do solo**. In: JONG van LIER, Q., 1º ed., 2º rei. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016. p. 1–24.

FERREIRA, M.M. **Física do Solo**. ESAL/FAEPE, 1993, 63.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. **Particle density**. In: DANE, J.H ; TOPP, G.C. (Ed). *Methods of soil analysis: part 4 – physical methods*. Madison: American Society of America, 2002. p. 229-240.

FORSYTHE, W. **Física de suelos**. Costa Rica: IICA, 1975. 212p.

FRAGA, C. C. Resenha histórica do café no Brasil. **Agricultura em São Paulo**, v. 10, n. 1, 2 p. 1-21, 1963.

FREDDI, O.S.; FERRAUDO, A.S.; CENTURION, J.F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:953-961, 2008.

FREIRE, J. C.; SCARDUA, R. Curva característica de retenção de água de um Latossolo Roxo distrófico do município de Lavras, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 95-98, 1978.

GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, 1986. p.383- 411. (Agronomy Series, 9)

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no crescimento e na produção de feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 3, p. 765–773, 2014.

GUBIANI, P.I. Regularidade de resposta da cultura do milho à compactação do solo. 154f. **Tese (Doutorado em Ciência do Solo)** - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2012.

GUERIF, J. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. **Journal of Agriculture Engineering Research**, London, v.29, p.367-374, 1984.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; DEFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Advanced Agronomy**, Newark, v. 41, p. 331–338, 1989.

HAMZA M.A., ANDERSON W.K. Soil compaction in cropping systems. **Soil Till Res.** 82, 121–145, 2005.

HILLEL, D. *Fundamentals of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. 413p.

HOLTZ, R. D., KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering Englewood**, Cliffs, Prentice-Hall, 1981. 733p.

HORN, R. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-36, 1995.

HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam : Elsevier, 1994. p.45-69.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M.S.; AJAYI, A.E.; GUIMARÃES, P.T.G.; PAIS, P.S.M.; ANDRADE, M.L.C. Comparison of field and laboratory models of the load bearing capacity in coffee plantations. **Ci Agrotec**. 2013;37:130-7.

IORI, P.; SILVA, R.B.S.; DIAS JÚNIOR, M.S.; LIMA, J.M. Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**.

ISHAQ, M., HASSAN, A., SAEED, M., IBRAHIM, M., LAL, R. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan I. Soil physical properties and crop yield. **Soil Till Res**, 59:57-65, 2001.

KAMIMURA, K.M.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; SANTOS, G.R.; OLIVEIRA, M.S. Load bearing capacity of a Red-Yellow Latosol in a coffee plantation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2012;36:1457-65.

KELLER, T. et al. Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 4, p. vzj2016.11.0118, 2017.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, 154:398-406, 2010.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KIM, H.-M.; ANDERSON S. H.; MOTAVALLI, P. P.; GANTZER, C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v.160, p.244-251, 2010.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Ed. Universidade de Passo Fundo. 3º edição, 2014.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ediupf, 2008.

KONDO, M.K.; DIAS JUNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999.

LEBERT, M.; HORN, R.A. Method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 275-286, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.** 1, 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2005.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. **Ciência e cultura**, v. 63, n. 3, p. 27-29, 2011.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, 116:107-136, 2003.

LIU, Q. et al. Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N₂O emissions? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 104, p. 8–17, 2017.

MAIA, P. L. et al. Agronomic performance of coffee in response to framework pruning in cycles of the —safra zero. **Coffee Science**, v. 15, n. 1, p. 1–7, 2020.

MALTONI, K.L. Estudo da compactação e, ou, adensamento em subsuperfície de latossolos sob diferentes usos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 73p. (**Tese de Doutorado**).

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M; SANTOS JUNIOR, J. D. G; SÁ, M. A. C. de; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.873-882, 2007.

MARIA, I. C.; KOCSSI, M. A.; DECHEN, S. C. F. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. **Bragantia**, v.66, p.291-298, 2007.

MARTINS, M.V.; PASSOS, E.; CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M. MONTANARI, R. Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 1, 147-154, 2009.

MARTINS, P.C.C; DIAS JÚNIOR, M.S.; CARVALHO, J.S.; SILVA, A.R.; FONSECA, S.M. Levels of induced pressure and compaction as caused by forest harvesting operations. **Cerne**. 2013;19:83-91.

MEDRADO, E.; LIMA, J. E. F. W. Development of pedotransfer functions for estimating water retention curve for tropical soils of the Brazilian savanna. **Geoderma**, v. 1, p. 59-66, 2014.

MENEZES-SILVA, P. E. et al. Photosynthetic and metabolic acclimation to repeated drought events play key roles in drought tolerance in coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 15, p. 4309–4322, 2017.

MIELNICZUK, J. Importância do estudo de raízes no desenvolvimento de sistemas agrícolas sustentáveis. In: **Workshop sobre sistema radicular: metodologias e estudo de caso**, 1999, Aracaju, SE. Anais... Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 1999. p.13-17

MIYAZAWA M.; BARBOSA, G.M.C. Efeitos da agitação mecânica e matéria orgânica na análise granulométrica do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 7, p. 680-685, 2011.

MORALES, F. et al. Photosynthesis in poor nutrient soils, in compacted soils, and under drought. In: *The leaf: A platform for performing photosynthesis*. **Springer**, p. 371–399, 2018.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NASCIMENTO, P. DOS S.; BASSOI, L. H.; PAZ, V. P. DA S.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. DE MENDONÇA. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. **Irriga**, v. 15, n. 2, p. 193-207. 2010.

NASCIMENTO, V. N. et al. Atributos físicos do neossolo regolítico distrófico sob pastagem submetido à colheita mecanizada da forragem e pastejo animal. **Boletim de Indústria Animal**, v. 74, p. 169–175, 2017.

NETO, E. L. S.; FIGUEIREDO, L. H. A.; BEUTLER, A. N.; Dispersão da fração argila de um latossolo sob diferentes sistemas de uso e dispersantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2009.

OADES, J. M.; The retention of organic matter in soils. **Biogeochemistry**. 1988

OLIVEIRA, G. C. et al. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 327–336, 2004.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S; CURTI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesq. Agropec. Bras.**, 38:291-299, 2003.

OLIVEIRA, J. F. de; HURTADO, S. M. C.; III, S. Mayi; MARCHÃO, R. L.; CORAZZA, E. J.; GUIMARÃES, M. de F.. Variabilidade e correlação espacial entre atributos e a umidade gravimétrica de um Latossolo Vermelho Amarelo. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, Á. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. (ed.). **Agricultura de precisão um novo olhar**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 148-152.

OLIVEIRA-FILHO, A.T e FONTES, M.A.L. Padrões de diferenciação florística em florestas atlânticas no sudeste do Brasil e a influência do clima. **Biotropica**, 32 (4b): 793-810, 2000.

PAIS, P.S.M.; DIAS JÚNIOR, M.S.; DIAS, A.C.; IORI, P. GUIMARÃES, P.T.G.; SANTOS, G.A. Load-bearing capacity of a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee plants subjected to different weed managements. **Ci. Agrotec**. 2013;37:145-51.

PAIS, P.S.M.; DIAS JÚNIOR, M.S.; SANTOS, G.A.; DIAS, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALCÂNTARA, E.N. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2011;35:1949-57.

PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S.; SILV, J.B. Agregação de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, Campinas, v. 23. p. 189-195, 1999.

PANAYIOTOPOULOS, K.P.; PAPADOPOULOU, C.P.; HATJIIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. **Soil Till Res**, 31:323-337, 1994.

PENG, X.H.; HORN, R.; ZHANG. B.; ZHAO, Q.G. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. **Soil Till Res**. 2004;76:125-37.

PINHEIRO-DICK, D. & SCHWERTMANN, U. Microaggregates from Oxisols and Inceptisols: dispersion through selective dissolutions and physicochemical treatments. **Geoderma**, 74:49-63, 1996.

PIRES, B.S.; DIAS JÚNIOR, M.S.; ROCHA, W.W.; ARAÚJO JÚNIOR, C.F.; CARVALHO, R.C.R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2012;36:635-42.

PIRES, L.F.; BORGES, J.A.R.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

POTOCKA, I.; SZYMANOWSKA-PULKA, J. Morphological responses of plant roots to mechanical stress. **Annals of botany**, v. 122, n. 5, p. 711–723, 2018.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of Soil Organic Carbon on Soil Water Retention. **Geoderma**, 116:61-76, 2003.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri: Manole, 2008.

REICHERT, J.M., REINERT, D.J., SUZUKI, L.E.A.S., HORN, R. **Mecânica do solo**. JONG VAN LIER, Q. (Editor). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 294p, 2010.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A.; GUBIANI, P.I.; KAISER, D.R.; MINELLA, J.P.G. & REINERT, D.J. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. In: FILHO, O.K.; MAFRA, A.L. & GATIBONI, L.C., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. v.7, p.1-54.

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

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

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÄKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Till. Res.** 102, 242-254, 2009.

REINERT, D.J. Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf. 1990. 128f. **Tese Doutorado** - Michigan State University.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo: protótipos e teste. **Ciência Rural**, v.36, n.6, p.1931-1935, 2006.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, 2006. 18p.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3–4, p. 252–263, 2009.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; TAN, C.s.. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, n. 3-4, p. 466-474, ago. 2008. Elsevier BV.

REZENDE, J.O. Compactação e adensamento do solo, metodologia para avaliação e práticas agrícolas recomendadas. In: **Congresso brasileiro de ciência do solo**, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

RIBEIRO, J.F. E WALTER, B.M.T. Fitofisionomias do bioma cerrado. Pp. 89-166. In: S.M. Sano & S.P. Almeida (eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina, Embrapa-CPAC, 1998.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p. 128-152.

RIZZINI, C.T. **Tratado de Fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos**. 2ª ed. Âmbito Cultural Edições Ltda, 1997.

RODRIGUES, J. A.; VIOLA, M. R.; ALVARENGA, L. A.; MELLO, C. R.; CHOU, S. C.; OLIVEIRA, V. A.; UDDAMERI, V.; MORAIS, M. A. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2511-2526, 2020.

RÖMKENS, M.J.M. & MILLER, R.D. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data – a mathematical model. **Plant Soil**, 248:237-248, 1971.

ROZANE, D. E.; CENTURION, J. F.; ROMUALDO, L. M.; TANIGUCHI, C. A. K.; TRABUCO, M.; ALVES, A. U. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v.26, p.24-32, 2010.

RÜHLMANN, J.; KORSCHENS, M.; GRAEFE, J. A new approach to calculate soil particle density considering soil organic matter and mineral matrix properties. **Geoderma**, 130 (2006), pp. 272 - 283

SAMPAIO, FABRÍCIO DE M. T.; FERREIRA, MOZART M.; OLIVEIRA, MARCELO S. DE; ALMEIDA, ALBERTO C.; JOSÉ, MARCOS R. Variabilidade espacial da umidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 854-861, out. 2010.

SANTINATO, F. et al. Análise econômica da colheita mecanizada do café utilizando repetidas operações da colhedora. **Coffee Science**, v. 10, n. 3, p. 402–411, 2015.

SANTOS, H. G., et al.; **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa. Brasília, 2018.

SANTOS, JL et al. Caracterização física e química de um Planossolo localizado no semiárido Baiano. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 9, n. 3, pág. 13-17, 2013.

SANTOS, R.M; OLIVEIRA-FILHO, A.T.; EISENLOHR, P.V.; QUEIROZ, L.P.; CARDOSO, D.B.; RODAL, M.J.N. Identity and relationships of the Arboreal Caatinga among other floristic units of seasonally dry tropical forests (SDTFs) of North-eastern and Central Brazil. **Ecol Evol** 2:409–428, 2012.

SCHJØNNING, P.; MCBRIDE, R.A.; KELLER, T.; OBOUR, P.B. Prediction of soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, 286, 83-87, 2017.

SEVERIANO, E.C.; OLIVEIRA, G.C.; DIAS JÚNIOR, M.S.; OLIVEIRA, L.F.C.; CASTRO, M.B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2008;32:1419-27.

SILVA V.R. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.

SILVA, A. H. da; Favaretto, N.; Cavalieri, K.M.V.; Dieckow, J.; Vezzani, F.M.; Parron, L.M.; Cherobim, V.F.; Marioti, J.; Henrique Ferrari Neto. Atributos físicos do solo e escoamento superficial como indicadores de serviços ambientais. In: PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B.; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. **Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica**. Eds. Embrapa Floresta. Brasília, DF. 2015., 368p.

SILVA, A.P., KAY, B.D., PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Sci Soc Am J**. 58:1775-1781, 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, B. M.; SILVA, É. A. D.; OLIVEIRA, G. C. D.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 38 n. 2, p. 464-475, 2014.

SILVA, C.L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, p.32, n.2, p.213-20, 1997.

SILVA, É. A.; BENEVENUTE, P. A. N.; MELO, L. D. Qualidade física de um Latossolo estimada por estudos das curvas de retenção de água, indicadores de fácil determinação e “índice S”. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 11 n. 4, p. 49-54, 2017.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Respostas fisiológicas da soja ao déficit hídrico em dois solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.16, p.669-675, 1981.

SILVA, J. F.; FARIÑAS, M. R.; FELFILI, J. M.; KLINK, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the Cerrado region of Brazil. *Journal of Biogeography*, v. 33, p. 536-548, 2006

SILVA, J. M. C.; BATES, J. M. Biogeographic patterns and conservation in the south American Cerrado: a tropical savanna hotspot. **Bioscience**, v. 52, n. 3, p. 225-234, 2002.

SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L.; FRANZ, C.A.B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2003;23:219-26.

SILVA, R.B.; IORI, P.; SILVA, F.A.M.; DIAS JÚNIOR, M.S. Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **R Ci Agron.** 2010;33:376-89.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande , v. 10, n. 4, p. 842-847, Dec. 2006 .

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 1065-1068, 2000.

SILVA; A.S.; SILVA, I.F.; BANDEIRA, L.B.; SILVA NETO, L.F. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 10, p. 1783-1789, out/2014

SILVEIRA, P.M.; SILVA, J.H.; LOBO JUNIOR, M.; CUNHA, P.C.R. Atributos do solo e produtividade do milho e do feijoeiro irrigado sob sistema integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1170-1175, 2011.

SKOPP, J.M. Physical properties of primary particles. ME Summer (Ed.) , **Handbook of solo science** , CRC Press , Boca Raton (2000) , pp. A3 - A17

SMITH, P., SMITH, J.U., POWLSON, D.S., MCGILL, W.B., ARAH, J.R.M., CHERTOV, O.G., COLEMAN, K., FRANKO, U., FROLKING, S., JENKINSON, D.S., JENSEN, L.S., KELLY, R.H., KLEIN-GUNNEWIEK, H., KOMAROV, A.S., LI, C., MOLINA, J.A.E., MUELLER, T., PARTON, W.J., THORNLEY, J.H.M., WHITMORE, A.P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma**, 81:153-225, 1997.

SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. (eds.). Mechanics related process in structured agricultural soils. **NATO applied sciences**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1989. v.172, p.205-221.

SNEDECOR, G. W., COCHARAN, W. G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames, Iowa State University Press, 1989.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compatibility: A review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.

STEPNIEWSKI, W., GLINSKI, J., BALL, B.C. **Effects of compaction on soil aeration properties**. In: SOANE, B.D., van OUWERKERK, C. (Editors). Soil compaction in crop production. Amsterdam, Elsevier. p.167-190, 1994.

STOLF, R; THURLER, A. M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT. K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. **Rev. Bras. Ciên. Solo.** 35:447-459, 2011.

STONE, R.J.; EKWUE, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils affected by the incorporation of peat. **J Agric Eng Res**, v.60, p.15-24, 1995.

TAVARES, M. H. F.; FELICIANO, J. J. DA S.; VAZ, C. M. P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, v. 13 n. 4, p. 517-524, 2008.

TEIXEIRA, W. G.; BHERING, S. B. RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PELOS MÉTODOS DA MESA DE TENSÃO E DA CÂMARA DE RICHARDS. In: **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília: EMBRAPA, 2017. p. 33-46.

TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S. Soil bulk density evaluation by conventional and nuclear methods. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 1, p. 97-103, 2005

TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R.C.J.; REICHARDT K.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Sci. agric**. 2006, vol. 63, n.1, p.55-64.

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. **J. Soil Sci.**, 33:141-163, 1982.

TORMENA ET AL. Intervalo Ótimo De Potencial Da Água No Solo: Um Conceito Para Avaliação Da Qualidade Física Do Least Limiting Potential Range: a Concept To Evaluate the Soil. **Engenharia Agrícola**, v. 3, n. 3, p. 286-292, 1999.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 22:573-581, 1998.

USDA- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **United States Department of Agriculture**, 2020.

VAN BAVEL, C.H.M. Report of the Committee on Physical Analyses 1951-1953, Soil Science Society of America. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, 17:416-418, 1953.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J; YATES, S. R. O Código RETC para Quantificação das Funções Hidráulicas de Solos Não Saturados, Versão 1.0. **Relatório EPA 600 / 2-91 / 065, US Salinity Laboratory**, USDA, ARS, Riverside, Califórnia, 1991.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VAN LIER, Q. de J. **Física do solo - baseada em processos**. Piracicaba: USP, 2020. p. 413.

VAN LIER, Q. J. Gases no solo. In: JONG VAN LIER, Q., org. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v.1. p.153-176.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from outer Brazil. as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v 92, p. 104- 113, 2007.

VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K.; CEDDIA, M. B.; UNTERLINE, B. et al.; Granulometria dos solos da ix rcc do acre. IX Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos: Sistemas Amazônicos – Solos sedimentares em Potencialidade e demanda de pesquisa. **SBCS**. 2010.

VIEIRA, M.J. Comportamento físico do solo em plantio direto. In: FANCELLI, A.L.; TORRADO, P.V.; MACHADO, J. (Coords.). **Atualização em plantio direto**. Campinas: Fund. Cargill, 1985. p.163- -179

VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLoS ONE**, v. 14, n. 7, p. 1–15, 2019.

WALKLEY, A. & BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Sci.**, 37:29-38, 1934.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WEISSKOPF, P.; REISER, R.; REK, J.; OBERHOLZER, H. R. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. **Soil & Tillage Research**, v.111, p.65-74, 2010.

WILDING, L.P.; LIN, H. Advancing the frontiers of soil science towards a geosciences. **Geoderma**, v.131 p.257-274, 2006.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

ARTIGO 1

Artigo elaborado de acordo com a NBR 6022:2018

CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGAS DE UM LATOSSOLO SUBMETIDO A DUAS ALTERNATIVAS DE USO DO SOLO E SOB FLORESTA NATIVA

LOAD SUPPORT CAPACITY OF A LATOSSOLO SUBMITTED TO TWO ALTERNATIVES OF LAND USE AND UNDER NATURAL FOREST

RESUMO

Um dos principais fatores da degradação do solo é a compactação, cujas causas incluem práticas florestais e agrícolas inadequadas. O tipo e a intensidade desse manejo alteram a estrutura do solo e comprometem a qualidade física dessas áreas. A pressão de pré-consolidação (σ_p) constitui uma ferramenta eficaz e importante alternativa na análise da compactação do solo. Nesse sentido, objetivou-se, com esse trabalho, analisar a capacidade de suporte de cargas de um latossolo submetido a duas alternativas de uso do solo e sob Floresta Nativa em uma fazenda experimental da UFVJM, localizada em Curvelo, MG. Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas do Cerrado (CE), do sistema Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) e da Floresta Nativa (FN) para análises texturais e de matéria orgânica desses locais. Para a obtenção da pressão de pré-consolidação (σ_p) e a definição dos modelos de capacidade de suporte de carga do latossolo, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, utilizando-se um consolidômetro da marca Boart Longyear®. As áreas de uso correspondente ao sistema ILPF e ao CE não apresentaram diferença significativa entre si quanto a σ_p , devido a ambas as áreas terem sofrido pisoteio animal e, ou tráfego de máquinas. Por outro lado, houve diferença significativa entre o sistema ILPF e o CE em relação a FN, tendo estes dois usos do solo apresentando uma maior σ_p . A explicação para o solo da FN ter apresentado uma menor σ_p deve-se a maior

disponibilidade de matéria orgânica (MO) neste ambiente, uma vez a MO promover uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo.

Palavras-chave: Compactação. Pré-consolidação. Solo. Uso do solo. Floresta nativa.

ABSTRACT

One of the main factors of soil degradation is compaction, whose causes include inadequate forestry and agricultural practices. The type and intensity of this management change the soil structure and compromise the physical quality of these areas. The pre-consolidation pressure (σ_p) is an effective tool and an important alternative in the analysis of soil compaction. In this sense, the aim of this work was to analyze the load bearing capacity of an oxisol submitted to two alternative land uses and under Native Forest in an experimental farm at UFVJM, located in Curvelo, MG. Undisturbed and deformed samples were collected from the Cerrado (CE), from the Integração Lavoura Pecuária Floresta system (ILPF) and from the Native Forest (FN) for textural and organic matter analysis of these locations. To obtain the pre-consolidation pressure (σ_p) and define the latosol load bearing capacity models, the samples were submitted to a uniaxial compression test, using a Boart Longyear® consolidometer. The areas of use corresponding to the ILPF system and the EC did not differ significantly from each other in terms of σ_p , due to the fact that both areas have suffered animal trampling and/or machine traffic. On the other hand, there was a significant difference between the ILPF system and the EC in relation to the FN, with these two land uses having a higher σ_p . The explanation for the NF soil having a lower σ_p is due to the greater availability of organic matter (OM) in this environment, since the OM promotes a decrease in the load pressure applied to the soil structure.

Keywords: Compaction. Pre-consolidation. Soil. Land use. Native forest.

1 INTRODUÇÃO

O tráfego em excesso em áreas de cultivo e a utilização de máquinas de grande porte podem provocar modificações importantes no solo, ocasionando consequências adversas como aumento da resistência mecânica à penetração das raízes, alteração na disponibilidade de fluxo e na capacidade de retenção da água e nutrientes, bem como redução da aeração do solo (LIMA & LEITE, 2014; EPRON *et al.*, 2016; CAMBI *et al.*, 2017).

Assim, o uso intensivo do solo de maneira inadequada pode gerar grandes prejuízos, como a compactação (SECCO *et al.*, 2009; KUNZ *et al.*, 2013), que se resume à deformação volumétrica do solo e alteração nas suas características físicas, provocando uma mudança na relação água-solo (Rocha *et al.*, 2007). Essa compactação pode afetar a porosidade e a densidade do solo, onde um solo com menor número de espaços vazios (poros) se torna mais denso (TANG *et al.*, 2011), aumentando assim sua resistência mecânica à penetração e reduzindo o crescimento radicular das plantas, resultando na redução da produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2002; GUBIANI *et al.*, 2013).

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, durante a qual ocorre um aumento da densidade, em consequência da redução de volume pela expulsão do ar (DIAS JÚNIOR & PIERCE, 1996). A compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (SMUCKER & ERICKSON, 1989).

A intensidade de compactação do solo depende de vários fatores, que incluem a pressão exercida pelo maquinário utilizado, em virtude do tamanho e tipo dos rodados, peso, frequência do tráfego na área de cultivo (LIMA e LEITE, 2014), textura, agregação e umidade do solo, sendo este último um dos fatores mais importantes no manejo do solo (LOPES *et al.*, 2006, 2011).

Um superpastejo causa compactação, devido ao impacto do pisoteio intensivo sob altas taxas de lotação animal, podendo provocar uma perda considerável da cobertura do solo (COLLARES *et al.*, 2011). Assim, um maior grau de compactação dependerá, principalmente, da umidade, da classe do solo e da taxa de lotação animal (MARCHÃO *et al.*, 2007).

Entre as técnicas mais utilizadas de quantificação da compactação do solo, citam-se: a pressão de pré-consolidação, também definida como capacidade de suporte de cargas, que é a máxima pressão que o solo suporta sem se deformar permanentemente (DIAS JUNIOR,

1994) e o grau de compactação, que relaciona a densidade do solo natural com a densidade do solo máxima (DIAS JUNIOR & MIRANDA, 2000; OLIVEIRA *et al.*, 2010).

O tráfego intenso de máquinas e pisoteio animal em solo com umidades que favoreça a compactação tem se tornado preocupante para a manutenção de uma atividade agropecuária eficiente e conservacionista (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996; SILVA *et al.*, 2002). Desse modo, torna-se fundamental determinar a pressão aplicada ao solo e a condição de umidade deste.

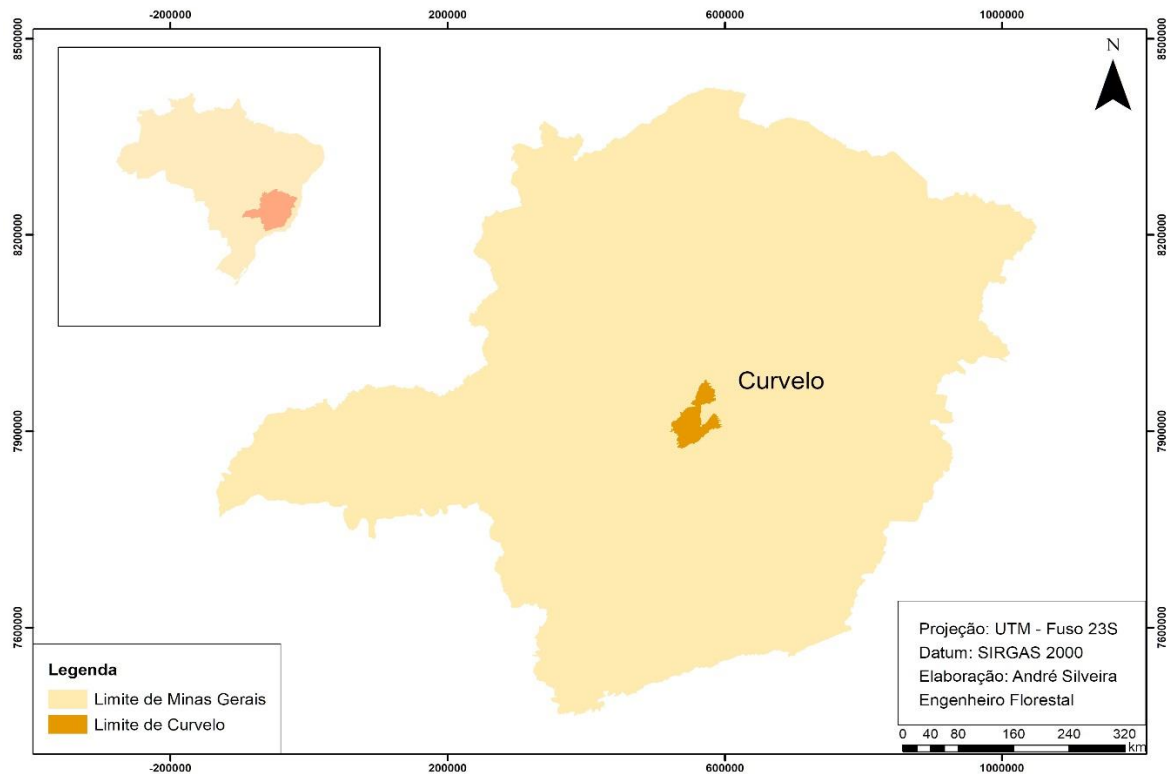
A hipótese estabelecida para o desenvolvimento desta pesquisa é de que os diferentes usos e floresta nativa podem alterar os atributos físicos e mecânicos do solo e degradar a estrutura do solo, afetando a pressão de pré-consolidação (σ_p) e o seu comportamento compressivo.

Neste sentido objetivou-se com este trabalho, gerar modelos de capacidade de suporte de carga para os diferentes usos e floresta nativa e através destes avaliar a degradação da estrutura do solo, definindo as pressões de pré-consolidação de cada área e a partir delas tomando medidas necessárias para um melhor uso de cada área.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) situada em Curvelo, MG. O clima do município é considerado como tropical de altitude Cwa, segundo a classificação de Koppen-Geiger, característica advinda de sua altitude média de 672 metros e da latitude de 18,45°S e longitude de 44,25°W. Sendo assim, o período de verão registra chuvas e temperaturas elevadas, enquanto o inverno é seco com temperaturas mais baixas. O solo nesta área é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com textura média (EMBRAPA, 2018).

Figura 4. Localização das áreas de estudo.



O estudo foi conduzido nas seguintes áreas: CE do tipo campo limpo composto, FN e ILPF. O CE é composto principalmente pelas espécies: *Burmanniaceae* (*Burmannia*), *Cyperaceae* (*Rhynchospora*), *Droseraceae* (*Drosera*), *Iridaceae* (*Cipura*, *Sisyrinchium*), *Lentibulariaceae* (*Utricularia*), *Lythraceae* (*Cuphea*), *Orchidaceae* (*Cleistes*, *Habenaria*, *Sarcoglottis*), *Poaceae* (*Aristida*, *Axonopus*, *Mesosetum*, *Panicum*, *Paspalum*, *Trachypogon*), *Caryocar brasiliense* Cambess. e *Polygalaceae* (*Polygala*), com alguns sinais de degradação do solo, devido ao pisoteio animal sofrido anteriormente durante um longo período causando processos erosivos e hoje se encontra em recuperação a mais de um ano. A FN, resquício de mata atlântica, é caracterizada por uma área preservada composta por uma sucessão avançada, onde as espécies principais são: *Jaboticaba sabará* (*Plinia trunciflora*), *Mamica de Porca* (*Zanthoxylum rhoifolium*), *Cedro Rosa* (*Cedrela fissilis*), *Casca D'Anta* (*Rauvolfia sellowii*), *Fedegoso* (*Senna pendula*), *Jerivá* (*Syagrus romanzoffiana*). A Integração Lavoura pecuária floresta (ILPF) implementada a 5 anos, é uma consorciação de *Eucalipto urograndis* com *Brachiaria brizanta* cv. MG5- Vitória. Complementando esse sistema, ocorre também o plantio de milho e a adubação é realizada segundo Ribeiro, (1999). Essa área, após a colheita do milho sofre pastejo de gado com taxa de lotação de 3,5 UA/ha. As amostras foram

coletadas no período de outubro de 2019, sendo essas deformadas e indeformadas para a realização dos estudos de Pressão de pré-consolidação (σ_p), conforme descrito a seguir.

Com auxílio de um Amostrador de *Uhland*, foram coletadas 30 amostras indeformadas em cada área, com anéis volumétricos de 6,40 cm de diâmetro por 2,54 cm de altura. Essas amostras foram coletadas aleatoriamente a partir da camada superficial e subsuperficial. Na camada superficial de 0-5 cm e de 20-40 cm foram coletadas 30 amostras, 10 amostras para cada área de estudo, seguindo, totalizando 180 amostras indeformadas. As amostras foram envoltas em filme plástico parafinadas para não perderem umidade e nem serem danificadas no transporte. Em cada ponto de coleta foram também coletadas amostras deformadas de solos, para a análise de textura, matéria orgânica e umidade. Todas as amostras foram levadas para o laboratório de Física e Mecânica dos Solos da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Foram feitas também a análise de textura em amostras deformadas de solo, pelo método da pipeta (DAY,1965; EMBRAPA,2017) e, do teor de matéria orgânica (RAIJ & QUAGGIO,1983). O volume do solo contido nos anéis é equivalente ao volume dos anéis. Para a determinação da pressão de pré-consolidação (σ_p), as amostras indeformadas foram saturadas por capilaridade em um período máximo de 72 horas e depois submetidas a um potencial matricial de - 6 kPa em um extrator de placas porosas de Richards. Uma vez estabilizadas, as amostras foram pesadas úmidas e encaminhadas para o ensaio de compressão uniaxial em um consolidometro da marca Boart Longyear®. A tabela 2 apresenta a análise textural, valores de matéria orgânica e umidade na capacidade de campo dos locais avaliados.

Tabela 2. Análise textural, matéria orgânica e umidade no potencial matricial de – 6kPa para as situações estudadas.

Situações	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	Umidade no potencial matricial de -6kPa (kg kg ⁻¹)
Camada 0-5 cm					
FN	57,8	16,0	26,2	3,8	0,33
CE	57,9	16,0	26,1	1,8	0,30
ILPF	61,0	21,0	18,0	1,6	0,30
Camada 20-40 cm					

FN	57,3	18,3	24,4	3,2	0,34
CE	55,8	19,1	25,1	1,2	0,32
ILPF	57,3	22,9	19,8	1,4	0,32

FN: Floresta Nativa; CE: Cerrado; ILPF: Integração Lavoura Pecuária e Floresta

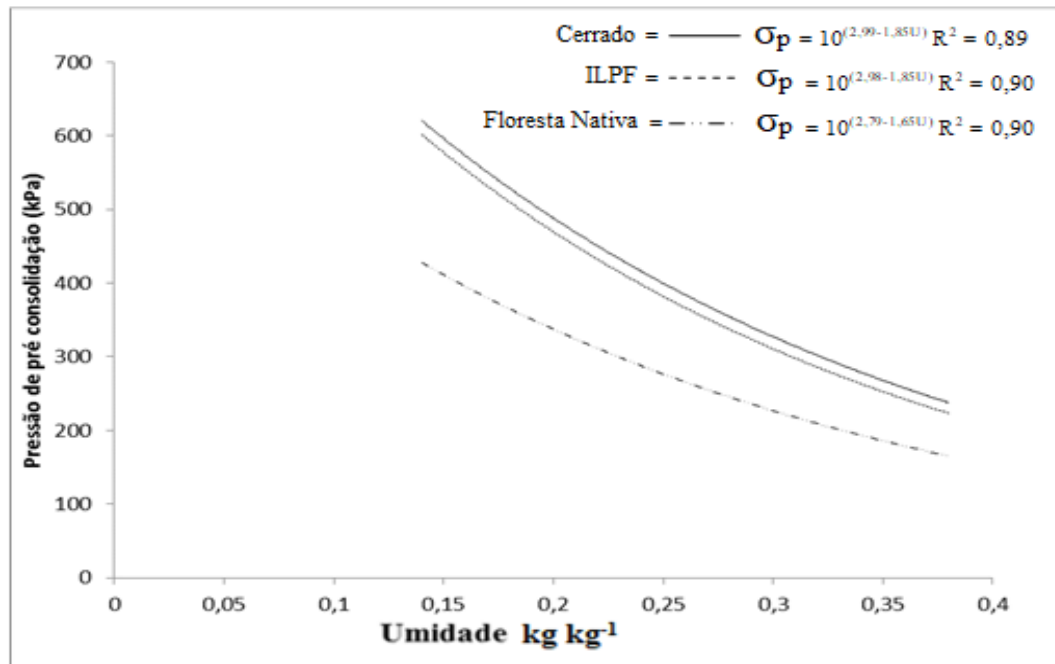
Na realização dos ensaios de compressão uniaxial aplicou-se em cada amostra, 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa de pressão, tendo sido a aplicação feita até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (DIAS JUNIOR & MARTINS, 2017), e aplicando-se logo a seguir uma nova pressão. Obteve-se as curvas de compressão do solo representando a pressão aplicada em escala logarítmica no eixo das abscissas, e a densidade do solo correspondente a cada pressão aplicada no eixo das ordenadas. Nas curvas de compressão do solo, foram obtidas as pressões de pré-consolidação (σ_p) (DIAS JUNIOR & MARTINS, 2017). Os valores de pressão de pré-consolidação com os valores de umidade foram ajustados a uma regressão exponencial decrescente do tipo: $\sigma_p = 10^{(a+b*x)}$ (DIAS JUNIOR, 1994). As letras a e b representam parâmetros empíricos de ajuste do modelo, ou seja, o coeficiente linear e angular, respectivamente quando o modelo é linearizado.

Foram realizadas as comparações entre os modelos de capacidade de suporte de carga utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares descrito em Snedecor & Cochran (1989) e para a obtenção dos modelos de capacidade de suporte de carga do solo utilizou-se o software Sigma Plot 8.0 (2002).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 5 apresenta os modelos de capacidade de carga para as duas alternativas de uso do solo e FN. O uso do CE apresentou uma maior capacidade de suporte de carga do que o ILPF seguido pela FN.

Figura 5. Modelos de capacidade de suporte de carga do CE, ILPF e FN.



Nota-se que os usos CE e ILPF apresentaram propriedades do solo bem semelhantes, ou seja, solos com o mesmo comportamento se encaixam em um único modelo para representá-los. A tabela 3 apresenta o resultado do teste de significância da comparação entre os modelos matemáticos gerados, onde o sistema ILPF e CE não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Snedecor & Cochran (1989) ao nível de significância de 5%, sendo assim um único modelo representou os dois usos.

Tabela 3. Teste de significância de acordo com Snedecor & Cochran (1989) entre as curvas compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo nas duas alternativas de uso do solo e FN.

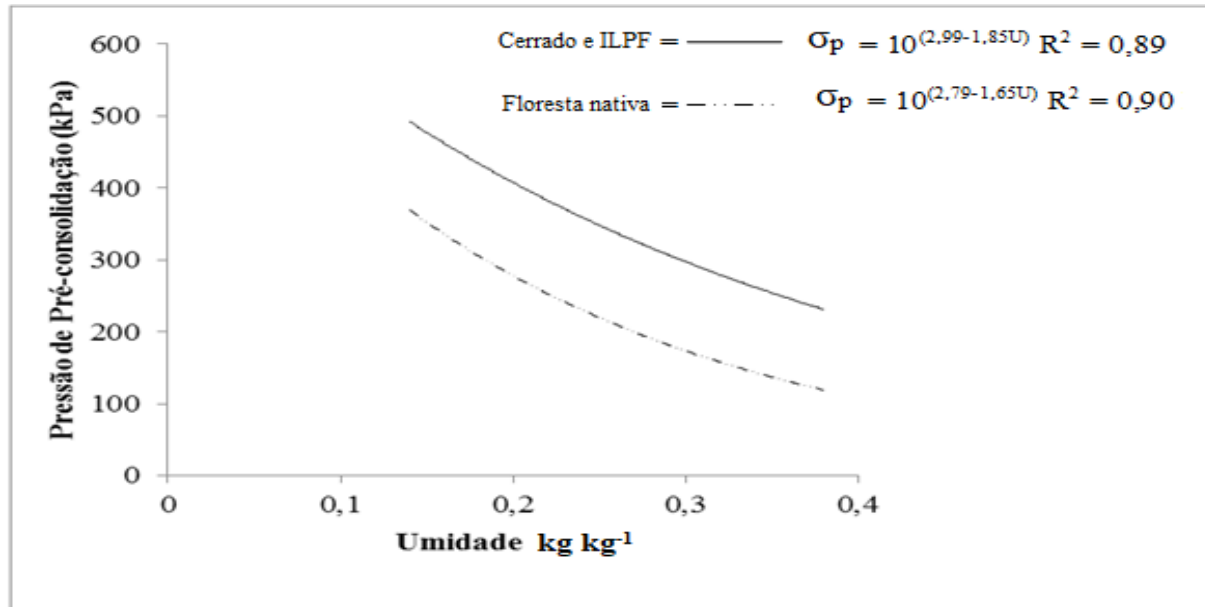
Usos e FN	F	
	Coefficiente angular, b	Coefficiente linear, a
FN vs ILPF	**	**
FN vs CE	**	**
ILPF vs CE	NS	NS

F: testa a homogeneidade dos dados; b coeficiente angular da regressão linearizada; a intercepto da regressão linearizada; NS: não significativo; ** significativo a 5% de probabilidade respectivamente.

Uma vez não detectada a diferença entre a capacidade de suporte de cargas do CE e ILPF, os dados foram agrupados e uma nova equação foi ajustada (Figura 6). De posse desse

novo modelo foram feitas as comparações entre eles, onde, CE e ILPF apresentaram uma maior capacidade de suporte de cargas que a FN.

Figura 6. Modelos de capacidade de suporte de carga do CE, ILPF e FN.



A ausência de diferença estatística entre o CE, ILPF podem ser explicadas pela classe de solo ser a mesma, as áreas estarem muito próximas e ambas terem sofrido pisoteio animal por pelo menos um ano. Além disso, o sistema ILPF e o CE, possuem baixa cobertura vegetal sobre o solo, fato que pode explicar também a ausência de diferença entre a capacidade de suporte de carga dessas duas situações, uma vez a cobertura vegetal também agir como aliviador das cargas aplicadas sobre o solo (PIRES *et al.*, 2012).

A diferença estatística encontrada para o CE e o sistema ILPF em relação à FN, pode ser explicada pelo maior conteúdo de matéria orgânica (MO) deste último ambiente (Tabela 2), uma vez a MO promover uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo e com menor capacidade de suportar cargas (Rocha *et al.*, 2007; PIRES *et al.*, 2012). Somado a isso, ressalta-se o fato de a FN não ter sofrido pisoteio animal e nem tráfego de máquinas, fatores estes preponderantes nesta menor capacidade de suporte de cargas.

Conforme a Figura 6, as áreas de ILPF e CE apresentaram maiores valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) em relação à FN. Esta maior resistência indica que provavelmente a estrutura do solo destes dois locais apresentaram deformação devido ao pisoteio (PULIDO *et al.*, 2017) e ou tráfego de máquinas (HAMZA & ANDERSON, 2005).

A tabela 4 apresenta os valores de pressão de pré-consolidação (σ_p) para as áreas de estudo, obtidas na umidade correspondente ao potencial matricial de -6 kPa. E também foram feitas medições mensais da umidade do solo nessas áreas para se chegar a uma média anual, onde o resultado obtido foi de 0,2 kg kg⁻¹. Assim, realizou-se uma simulação da capacidade de suporte de carga para as referidas, sendo seus valores apresentados na tabela 4. A partir dessas pressões de pré-consolidação pode-se definir limites de uso para cada área em cada época do ano, evitando assim danos físicos na estrutura do solo, prejuízos ambientais e econômicos em cada área de estudo.

Tabela 4. Pressão de pré-consolidação para as duas alternativas de uso do solo e FN na umidade da capacidade de campo e na umidade a 0,2 kg kg⁻¹ do solo.

Umidade no potencial matricial de -6kPa	
Usos do solo e FN	Pressão de pré-consolidação (kPa)
CE	271 a
ILPF	268 a
FN	175 b
Umidade em 0,2 kg kg⁻¹	
Usos do solo e FN	Pressão de pré-consolidação (kPa)
CE	415 a
ILPF	411 a
FN	288 b

Valores seguidos da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Snedecor & Cochran (1989).

Em valores reais, a pressão de pré-consolidação das áreas de ILPF e CE é muito superior a da FN, sendo o pisoteio animal considerado o fator mais importante nessa diferenciação. No Brasil, a média da pressão aplicada por tratores varia entre 200 e 300 kPa (PIRES *et al.*, 2012). Assim, o tráfego de máquinas nas referidas áreas não estaria comprometido caso realizado na umidade próxima à capacidade de campo. Contudo, nessa mesma umidade do solo, o pisoteio animal fica restrito, pois a carga média aplicada por animais na área passa dos 400k Pa (PIRES *et al.*, 2012). Desse modo, sugere-se que o manejo animal nestes locais seja revisto, ou seja, ajustado a carga animal com a variável umidade animal mais adequada para a área e, também que, o pisoteio se dê com maior frequência na época mais seca. Na época mais úmida por sua vez, a carga sobre o solo deve ser reduzida.

Ainda de acordo com a tabela 4, em condições de baixa umidade, a capacidade de suporte de cargas aumenta, pois, o solo tem sua resistência ampliada pela aproximação das

partículas (LARSON *et al.*, 1980). Nas áreas de CE e ILPF, em baixa umidade, o manejo animal não causaria danos à estrutura do solo, o qual resistiria à maioria das cargas aplicadas pelos animais. Porém, no caso de uma irrigação ou nos períodos chuvosos, a pressão de pastejo deve ser revista, considerando o número e/ou peso dos animais.

4 CONCLUSÕES

Os modelos de capacidade de suporte de carga se mostraram uma ferramenta muito eficaz na prevenção de danos físicos na estrutura solo, onde σ_p das áreas de ILPF e CE foram superiores à da FN. Deve-se notar também que a σ_p está totalmente relacionada com a umidade, onde, um solo mais seco suportou uma maior carga aplicada sem ocorrer maiores danos. A cobertura vegetal também exerceu um papel importante na capacidade de suporte de cargas das áreas estudadas, uma vez que, a FN apresentou menor valor de σ_p devido a seu elevado teor de matéria orgânica e não sofrer nenhum dano antrópico. Já o pisoteio animal foi considerado o fator mais relevante para a comparação entre as áreas, devido as modificações causadas na estrutura do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLAKE G. R.; HARTGE K. H. BULK DENSITY. IN: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, ASA/SSSA. 1986. Part 1. p.363-375.
- BOWLES, J. E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. New York, McGraw-Hill, 1986. 218p.
- CAMBI, M.; HOSHIKA, Y.; MARIOTTI, B.; PAOLETTI, E.; PICCHIO, R.; VENANZI, R.; MARCHI, E. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, 384:406-414, 2017.
- COLLARES, G.L.; REINERT D.J.; REICHERT J.M. & KAISER, D.R. Compactação superficial de Latossolos sob integração lavoura: pecuária de leite no noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 41:246-250, 2011.
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: Black, C. A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, America Society of Agronomy, 1965. Part.I. p.545-567
- DIAS JÚNIOR, M. S.; MIRANDA, E. É. V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de Lavras (MG). **Ciência e Agrotecnologia**., 24:337-346, 2000.
- DIAS JÚNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 20:175-182, 1996.
- DIAS JÚNIOR, M. S. **Compression of three soils under long- term tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; CRISTINA, P.C.C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisas do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília, Produção de informação, p.153 – 172, 2017.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Brasília, Embrapa Solos, 2018. 355p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas do Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília, Produção de informação, 2017. 577p.
- EPRON, D.; PLAIN, C.; NDIAYE, F.; BONNAUD, P.; PASQUIER, C.; RANGER, J. Effects of compaction by heavy machine traffic on soil fluxes of methane and carbon dioxide in a temperate broadleaved forest. **Forest Ecology and Management** 382:01-09, 2016.
- GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M.S.; GUIMARÃES, P.T.G.; OLIVEIRA, M.S. & AJAYI, A. E.Spatial patterns of preconsolidation pressure and soil moisture along transects in two directions under coffee. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**., 35:1189-1196, 2011.

GUBIANI, P. I.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Indicadores hídrico-mecânicos de compactação do solo e crescimento de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2013; 37:1-10.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**. 2005;82:121-45.

KUNZ, M.; GONÇALVES, A. D. M. A.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2013; 37:1699-708.

LARSON, W.E.; GUPTA, SC.; USECHE, R. A. Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Science Society of America Journal**, 44:450-457, 1980.

LIMA, J. S. S.; LEITE A. M. P. Mecanização. In: Machado, C. C. **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. cap 2, p. 42-72.

LOPES, E. S.; SAMPIETRO, J. A.; PEREIRA, A. L. N.; OLIVEIRA, D. Compactação de um Latossolo submetido ao tráfego de *skidder* com diferentes rodados. **Floresta**. 2011; 41:471-80.

LOPES, S. E.; FERNANDES, H. C.; VIEIRA, L. B.; MACHADO, C. C.; RINALDI, P. C. N.; Compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira. **Revista Árvore**. 2006; 30:369-76.

MARCHÃO, R. L.; BALBINO, L. C.; SILVA, E. M.; SANTOS JÚNIOR, J. D. G.; SÁ, M. A. C.; VILELA, L.; BECQUER, T. Qualidade física de um latossolo vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no cerrado. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 31, n. 3, p. 221-232, 1996.

MEROTTO, J. R. A.; MUNDSTOCK, C. M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.197-202, 1999.

OLIVEIRA, V. S.; ROLIM, M. M.; VASCONCELOS, R. F. B.; COSTA, Y. D. J.; PEDROSA, E. M. R. Compactação de um argissolo amarelo distrocoeso submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14:914-920, 2010.

PIRES, B. S.; DIAS JÚNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; CARVALHO R. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:635-642, 2012.

PULIDO, M.; SCHNABEL, S.; CONTADOR, J. F. L.; LOZANO-PARRA, J.; GÓMEZ-GUTIÉRREZ, Á.; BREVIK, E. C.; CERDÀ, A. Reduction of the frequency of herbaceous roots as an effect of soil compaction induced by heavy grazing in rangelands of SW Spain. **Catena**, v. 158, p.381-389, 2017.

RAJI, B.; QUAGGIO, J. A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 21p.

RIBEIRO, A.C; GUIMARÃES, P.T; ALVAREZ V., V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em minas gerais. Viçosa: **Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas gerais-CFSEMG**,1999.358.

ROCHA, W. W.; BORGES, S. R.; VICTÓRIA, E. P.; NUNES, A. B.; **Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental**. In: Abreu, M. H. N. Ciências Ambientais: abordagem multidisciplinar. Belo Horizonte: UEMG, 2007. p. 87-124.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**. 2009; 39:58-64.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. II – Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:9-15, 2002.

SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. (eds.). **Mechanics related process in structured agricultural soils**. NATO applied sciences. Amesterdam: Kluwer Academic Publishers, 1989. v.172, p.205-221.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames: Iowa State University, 1989.

TANG, A. M.; CUI, Y.; RICHARD, G.; DÉFOSSEZ, D. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**. 2011; 162:171-81.

ARTIGO 2

Artigo elaborado de acordo com a NBR 6022:2018

ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO SOB DIFERENTES USOS DO SOLO E FLORESTA NATIVA

PHYSICAL ATTRIBUTES OF A RED-YELLOW LATOSSOLO UNDER DIFFERENT LAND USES AND NATIVE FOREST

RESUMO

Os atributos físicos de um solo são importantes para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e florestais, tornando-se necessário para tal um monitoramento de sua qualidade. Nos últimos anos, a deterioração da qualidade do solo tem sido um assunto de suma importância na ciência do solo, na medida em que a retirada da cobertura vegetal e o uso intensivo da mecanização em todas as operações de cultivo podem resultar na diminuição da sua capacidade produtiva. Nesse sentido, objetivou-se com esse trabalho analisar os atributos físicos de um latossolo vermelho – amarelo submetido às diversas alternativas de uso do solo e sob floresta nativa. A amostragem e ensaios de campo foram realizadas na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), situada em Curvelo, MG. Coletou-se amostras indeformadas e deformadas no solo sob plantio de eucalipto (PE), cerrado (CE), integração lavoura, pecuária e floresta (ILPF), plantio convencional de milho (PCM), pastagem extensiva (PEX) e floresta nativa (FN). Foram realizados ensaios de Proctor normal para avaliar a densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação, resistência do solo à penetração e velocidade de infiltração básica (VIB). As alternativas de usos CE e PEX foram as que apresentaram maiores densidades do solo devido ao pisoteio animal, tendo a FN apresentado a menor densidade do solo, devido maior presença de matéria orgânica neste ambiente, gerando uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo. Os usos CE e PEX apresentaram também os menores valores de umidade ótima de compactação ($U_{ót}$), dado seu estado de consolidação pelo não revolvimento do solo e pisoteio de animais, bem como os maiores de grau de compactação

(GC), indicando uma maior alteração estrutural do solo quando comparados com a FN. Todos os sistemas apresentaram valores de velocidade de infiltração básica (VIB) inferiores ao da FN, indicando, que a atividade antrópica interferiu na estrutura do solo.

Palavras-chave: Solo. Compactação. Propriedades físicas. Usos. Floresta nativa.

ABSTRACT

The physical attributes of a soil are important for the sustainability of agricultural and forestry systems, making it necessary to monitor its quality. In recent years, the deterioration of soil quality has been a subject of paramount importance in soil science, as the removal of vegetation cover and the intensive use of mechanization in all cultivation operations can result in a decrease in soil capacity. productive. In this sense, the objective of this work was to analyze the physical attributes of a red-yellow latosol submitted to different land use alternatives and under native forest. Sampling and field trials were carried out at the Experimental Farm of the Federal University of Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), located in Curvelo, MG. Undisturbed and deformed soil samples were collected under eucalyptus (PE), cerrado (CE), crop, livestock and forest integration (ILPF), conventional corn planting (PCM), extensive pasture (PEX) and native forest (FN). Normal Proctor tests were carried out to evaluate the maximum soil bulk density and optimum compaction moisture, soil resistance to penetration and basic infiltration rate (VIB). The alternative uses CE and PEX were the ones that presented the highest soil densities due to animal trampling, with the NF having the lowest soil density, due to the greater presence of organic matter in this environment, generating a decrease in the load pressure applied to the structure of the soil. ground. The CE and PEX uses also presented the lowest values of optimum compaction moisture (U_{ót}), given their state of consolidation by not disturbing the soil and trampling animals, as well as the highest values of degree of compaction (GC), indicating a greater alteration structure of the soil when compared with the NF. All systems showed values of basic infiltration velocity (VIB) lower than the NF, indicating that anthropic activity interfered in the soil structure.

Keywords: Soil. Compaction. Physical properties. Uses. Native forest.

1 INTRODUÇÃO

A compactação do solo ocorre principalmente em sistemas de cultivos inadequados, sendo eles agrícolas ou florestais (SOMASUNDARAM *et al.*, 2018), em plantio direto pois há intenso tráfego de máquinas em sua maioria pesadas e de grande porte (FERREIRA *et al.*, 2020; TRENTIN *et al.*, 2018), o qual afeta sua estrutura e tem um efeito direto no rendimento das culturas (LIMA *et al.*, 2018; MARINS *et al.*, 2018; REICHERT *et al.*, 2009).

A danificação da qualidade do solo tem sido um tópico importante na ciência do solo, onde a retirada da cobertura vegetal e o uso desenfreado da mecanização em todas as operações de cultivo (semeadura, tratos culturais e colheita) podem ocasionar a diminuição da sua capacidade produtiva (MORAES *et al.*, 2016; TRENTIN *et al.*, 2018).

O solo compactado prejudica o crescimento e desenvolvimento das plantas e raízes, reduzindo a sua porosidade e condutividade hidráulica (REICHARDT e TIMM, 2020), além de aumentar sua resistência à penetração (SOUZA *et al.*, 2015). Os atributos morfológicos e fisiológicos da planta são afetados pelos atributos físicos do solo, como o crescimento e redução de sua altura, proporcionando um sistema radicular raso (SHAH *et al.*, 2017) e uma menor absorção de água e nutrientes, diminuindo assim o rendimento das culturas (COLOMBI e KELLER, 2019; MORAES *et al.*, 2020; RIVERA *et al.*, 2019).

Neste sentido, o monitoramento da qualidade do solo é de suma importância, sendo uma das formas a avaliação das suas propriedades físicas, as quais são necessárias para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e florestais. Essas propriedades são influenciadas pelo manejo do solo e podem ser usadas como indicadores de compactação, incluindo a densidade do solo (D_s) (MORAES *et al.*, 2016; REICHERT *et al.*, 2009; TRENTIN *et al.*, 2018), macroporosidade, dentre outros (BARBOSA *et al.*, 2019; MORAES *et al.*, 2016).

O grau de compactação representa a relação entre a densidade do solo (D_s) e a densidade do solo máxima ($D_{s_{máx}}$), obtida pelo ensaio de Proctor (STANCATI *et al.*, 1981), sendo considerado um indicador útil da condição física do solo, pois é uma forma de normalizar sua densidade do solo em relação à textura (KOUREH *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2016; ROSSETTI e CENTURION, 2015; SUZUKI *et al.*, 2007). O crescimento da raiz é restrito quando (D_s) excede ($D_{s_{máx}}$) (KELLER e HÅKANSSON, 2010). O grau de compactação, como a tensão matricial da água está relacionada com a porosidade e os limites de resistência à penetração, torna este parâmetro útil no estudo da compactação do solo (HÅKANSSON e JULHO, 2000).

A taxa de infiltração é determinada comumente a partir de dados de campo, sendo os principais métodos utilizados: infiltrômetro de anel, permeâmetro de disco, alagamento de bacias ou sulcos e aspersão (simulação de chuva) (LILI *et al.*, 2008).

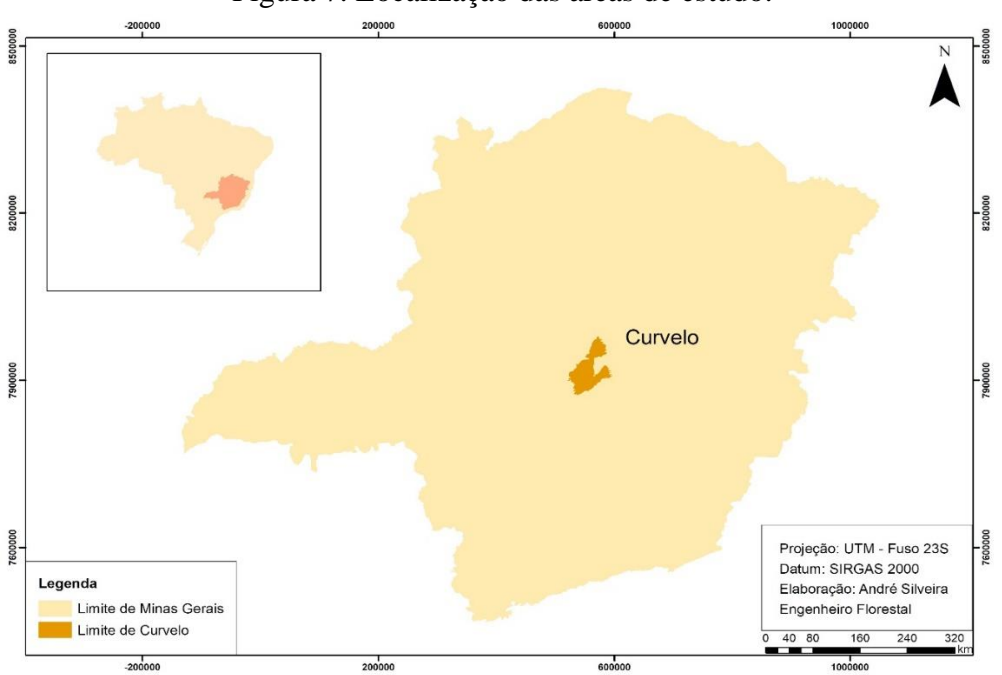
Diante do exposto objetivou-se com esse trabalho analisar os atributos físicos de um latossolo vermelho – amarelo submetido à diversas alternativas de uso do solo e sob floresta nativa, para que se gere resultados e conheça quais ações antrópicas causarão prejuízos e danos nesses usos. Portanto, determinando a densidade do solo, densidade do solo máxima, umidade ótima de compactação, umidade na capacidade de campo, grau de compactação, velocidade de infiltração básica e resistência do solo a penetração.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A coleta das amostras e ensaios de campo ocorreu na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), situada em Curvelo, MG.

As áreas do estudo encontram-se a uma altitude média de 700 m, com temperatura média anual de 18° a 36° C e precipitação média anual de 1709,4 mm. O relevo é suave ondulado em grandes extensões com declividade média de 6%. O solo da área de estudo foi classificado como latossolo vermelho-amarelo distrófico, textura média A moderado (Embrapa, 2017).

Figura 7. Localização das áreas de estudo.



Na área em estudo encontram-se as seguintes alternativas de uso do solo: Plantio de eucalipto (PE), Cerrado (CE), Integração Lavoura Floresta (ILPF), Plantio convencional de milho (PCM), Pastagem extensiva (PEX) e Floresta nativa (FN). Cada área de estudo é de aproximadamente dois hectares (ha). Os sistemas de plantio de eucalipto e de milho estão estabelecidos na área há sete anos, o cerrado sofreu pisoteio anteriormente durante um longo período e hoje se encontra em recuperação a mais de um ano.

O experimento foi constituído das seguintes avaliações: Ensaio de Proctor normal para se avaliar a densidade do solo máxima e umidade ótima de compactação, resistência do solo à penetração e velocidade de infiltração básica (VIB).

Para a obtenção da curva de compactação do solo foram coletadas amostras deformadas na camada 0-20 cm em cada área de estudo, no qual se compactaram cinco corpos de prova com umidades crescentes. A compactação dos corpos de prova se deu em três camadas, as quais receberam 25 golpes do soquete usado no ensaio de Proctor normal (STANCATI *et al.*, 1981), determinando-se em seguida, a densidade do solo. Para cada corpo de prova, uma amostra de solo foi coletada para a determinação da umidade. Os valores da umidade foram representados no eixo das abscissas e os da densidade do solo no eixo das ordenadas e a seguir representaram-se os pontos, obtendo-se por intermédio do software Excel for Windows, as equações de regressão tipo $D_s = a U^2 + b U + c$ que melhor se ajustaram aos pontos determinados. No ponto máximo da função obtiveram-se a densidade do solo máxima ($D_{smáx}$) e a umidade ótima ($U_{ót}$) de compactação por intermédio das expressões $D_{smáx} = -b/2a$ e $U_{ót} = -(b^2 - 4ac)/4a$ (IEZZI *et al.*, 1978), em que a, b e c são os coeficientes de ajustes das equações.

Os graus de compactação foram obtidos pela divisão dos valores de densidade do solo pelos valores da densidade do solo máxima obtido no ensaio de Proctor normal, multiplicados por 100.

Para o ensaio da resistência do solo à penetração utilizou-se um penetrômetro de molas da marca ELE International equipamento portátil de avaliação de perfis de solos. Foram coletadas amostras indeformadas de solo com o auxílio de uma amostrador do tipo Uhland, com anéis de 2,2cm de altura com 6 cm de diâmetro. Para cada área de estudo, coletou-se 30 anéis na profundidade de 5-10 cm, totalizando 180 amostras.

Coletaram-se também amostras deformadas de solos para sua caracterização, consistindo em análise de textura pelo método da pipeta (DAY, 1965; EMBRAPA, 2017), e teor de matéria orgânica (RAIJ e QUAGGIO, 1983).

Após a coleta, as amostras indeformadas foram embaladas em filme plástico e posteriormente parafinadas e identificadas. A utilização do filme plástico e a parafina garantiram que a estrutura da amostra foi preservada até o laboratório. O volume da amostra é correspondente ao volume do anel, sendo necessário para o seu preparo retirar as partes excedentes das superfícies, ou seja, realizar a toailete de cada uma das amostras.

Depois de preparadas às amostras indeformadas de solos foram saturadas com água destilada por 48 horas. Os ensaios de resistência à penetração ocorreram após a saturação das amostras e consistiu em medir a resistência do solo dentro do anel, usando o penetrômetro e pesando-se as amostras logo em seguida. Esse procedimento foi repetido até que o solo se encontrasse com um valor de umidade que não permitisse mais a leitura da resistência à penetração, sendo então, as amostras levadas à estufa a 105°C por 24h para secagem. Com os valores das massas dos solos úmidos e secos calculou-se as umidades correspondentes aos valores das resistências à penetração. De posse das informações de resistência à penetração versus umidade obteve-se os modelos matemáticos para avaliação da compactação ou não do solo, referentes às alternativas de uso estudadas. Os modelos gerados foram do tipo exponenciais e comparados estatisticamente segundo procedimentos descritos por Snedecor e Cochran (1989).

O ensaio de VIB foi conduzido segundo Bernardo (2006), o qual consiste na avaliação da infiltração de água no solo com o uso de dois anéis concêntricos chamados de anéis infiltrômetros. O valor da VIB de cada solo correspondeu à infiltração de água medida por um determinado tempo, sendo o valor adotado, aquele que apresentou três leituras iguais e consecutivas. Foram realizadas três repetições para cada área de estudo.

Para a determinação da capacidade de campo (cc) foram coletas 10 amostras indeformadas em cada uma das áreas de estudo, totalizando 60 amostras. Essas amostras foram saturadas com água destilada por 48 horas e, em seguida, equilibradas na unidade de sucção (Funil de Buchner) na tensão de -6kPa, correspondendo à capacidade de campo para cada alternativa de uso do solo (SILVA, 2007). Após foram calculadas as médias de cada uma das áreas estudadas, para a definição das suas respectivas capacidades de campo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 5 apresenta os atributos físicos e químicos do latossolo vermelho – amarelo para diferentes alternativas de uso do solo e sob floresta nativa, que foram obtidos no

Laboratório de Solos do Departamento de Ciência do Solo, da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Tabela 5. Caracterização física e matéria orgânica do latossolo vermelho-amarelo (LVAd) extraído na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), submetido a diferentes usos do solo e sob floresta nativa na profundidade de 10-20 cm.

Sistemas	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)	MO (%)
	----- g Kg ⁻¹ -----			
PE	26,0	57,0	15,1	1,9
CE	26,1	57,9	14,2	1,8
ILPF	25,6	57,1	15,3	2,0
PCM	26,0	56,7	15,7	1,6
PEX	26,0	56,9	15,3	1,8
FN	26,2	57,8	12,2	3,8

PE: Plantio de eucalipto; CE: Cerrado; ILPF: Integração lavoura pecuária floresta; PCM: Plantio convencional de milho; PEX: Pastagem extensiva FN: Floresta Nativa; MO: Matéria orgânica.

Na tabela 6 observa-se que, as alternativas referentes ao Cerrado (CE) e Pastagem extensiva (PEX) foram as situações que apresentaram maiores densidades do solo. Tal fato se explica pelo não revolvimento do solo e o pisoteio animal que o CE sofreu no passado e, o intenso pastejo animal que a PEX vem sendo submetida ao longo dos anos. A FN foi a situação que apresentou a menor densidade do solo, por possuir uma maior quantidade de matéria orgânica - MO (Tabela 5). Ressalta-se que a MO promove uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo, deixando-o menos coeso, mais friável (ROCHA et al., 2007; PIRES et al., 2012). Em seguida, o Plantio convencional de milho (PCM) foi o que apresentou menores valores de densidade do solo. Nesse uso (PCM) devido ao solo passar por sucessivas operações de revolvimento como, arações e gradagens, a estrutura deste é drasticamente alterada, deixando-o mais solto e, conseqüentemente, com menores valores de densidade do solo. Quando comparado ao CE e PEX as áreas de Plantio de eucalipto (PE) e Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) também apresentam menores valores de densidade do solo. Isto se explica por que estas áreas, PE e ILPF, embora tenham sido submetidas ao tráfego de máquinas durante seus preparos (subsolagem, aração e duas gradagens respectivamente), a estrutura destes locais foi drasticamente alterada pelo

revolvimento do solo, deixando-o mais solto e, conseqüentemente, com valores de densidade do solo não tão altos. Outro aspecto a ser considerado também é o de que ambas as áreas não sofreram pisoteio animal

Tabela 6. Médias de densidade e densidade máxima do solo ($D_{smáx}$), umidade ótima de compactação ($U_{ót}$), umidades na capacidade de campo, correspondente ao potencial matricial de -6 kPa (U_{cc}), grau de compactação e velocidade de infiltração básica para as diferentes alternativas de uso do solo estudados.

Manejo	Densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$)	$D_{smáx}$ ($Mg\ m^{-3}$)	$U_{ót}$ ($Kg\ Kg^{-1}$)	U_{cc} ($Kg\ Kg^{-1}$)	Grau de compactação (%)	VIB ($mm\ h^{-1}$)
PE	1,20b	1,62b	0,28a	0,31	74,1	32b
ILPF	1,18b	1,60b	0,28a	0,32	73,7	30b
CE	1,39a	1,79a	0,24c	0,30	78,1	20c
PCM	1,15b	1,53c	0,26b	0,30	75,2	28b
PEX	1,35a	1,72a	0,24c	0,30	78,5	20c
FN	1,01c	1,40d	0,28a	0,33	72,1	40a

U_{cc} - Umidade correspondente à capacidade de campo, $U_{ót}$ – Umidade ótima, VIB– velocidade de infiltração básica. (Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste de ‘‘Scott-Knot’’ ao nível de significância de 5%).

Ainda na tabela 6 verificou-se que a sequência decrescente de valores quanto a densidade do solo máxima de compactação ($D_{smáx}$) foi: CE > PEX > PCM > ILPF > PE > FN. Observou-se que as alternativas PEX e CE foram as que apresentaram maiores valores de $D_{smáx}$. A FN por sua vez foi a alternativa que apresentou o menor valor de $D_{smáx}$. Ressalta-se que maiores valores de $D_{smáx}$ não expressam a compactação do solo, sendo apenas parte do cálculo de seu grau, o qual segundo Dias Junior et al., (2007), pode expressar com maior clareza apenas seu estado.

Neste estudo obteve-se ainda por intermédio do ensaio de Proctor normal a umidade ótima de compactação ($U_{ót}$), ou seja, a umidade na qual o solo quando submetido a uma quantidade excessiva de cargas tem uma maior propensão em se compactar (RAGHAVAN et al., 1990). A tabela 6 apresenta os valores de $U_{ót}$ para as diferentes alternativas estudadas, na qual verificou-se que o CE e PEX apresentaram os menores valores de $U_{ót}$, dado seu estado de consolidação pelo não revolvimento do solo e pisoteio de animais. Essas alternativas de usos tendem a apresentar menores valores de porosidade total, o que de certa forma ocasiona menores valores de $U_{ót}$. Na prática isto significa que em períodos de chuva, esses solos

requerem maiores cuidados quanto aos seus usos, pois podem ser mais susceptíveis à compactação.

A umidade correspondente à capacidade de campo - U_{cc} (Tabela 6) tem também grande influência na susceptibilidade dos solos à compactação (SÁ e SANTOS JUNIOR, 2005). Observou-se, porém, que para todas as alternativas de uso do solo, o valor de U_{cc} é superior ao valor da $U_{ót}$, indicando um risco. Pois se no momento da irrigação o solo é mantido com umidade próxima à da capacidade de campo e, entre uma irrigação e outra, essa umidade é reduzida por processos fisiológicos de redistribuição da água no perfil e de evapotranspiração, possivelmente chegará a valores muito próximos aos da $U_{ót}$, (Tabela 6). Ressalta-se que um solo em condições ideais ou próximo dessa situação, aliado ao intenso tráfego de máquinas e, ou pisoteio animal, apresenta um alto potencial de compactação.

Ao analisar-se PE e ILPF verificou-se que o valor de $U_{ót}$ é muito próximo de U_{cc} , conferindo a essas duas alternativas de uso do solo um enorme potencial para a compactação, caso sejam irrigados.

Para a FN, a maior quantidade de matéria orgânica (MO) pode influenciar nos valores de $U_{ót}$, pois, por suas características físicas e químicas a retenção de água é aumentada, podendo reduzir também $D_{smáx}$. Os menores valores de $D_{smáx}$ ocorrem pelo efeito de amortecimento, uma vez a MO deixar o solo mais leve e com menores densidades do solo. Os maiores valores de $U_{ót}$ ocorrem pela alta capacidade de adsorção da MO, o que foi observado também por Aragón et al., 2000; e Ball et al., 2000.

Segundo Santos (2005), o grau de compactação (GC) tem sido aceito como indicativo da compactação dos solos. Este autor afirma ainda que, valores acima de 75% para GC apresentaram limitações ao desenvolvimento da cultura do milho. Porém, Carvalho et al., 2010 encontraram gramíneas se desenvolvendo bem onde o grau de compactação medido foi de 88%. Neves Junior et al. (2013) estudando o grau de compactação obtido pelo ensaio de Proctor normal, concluíram que o valor crítico limitante do desenvolvimento das culturas seria de 86%. Contudo, não se tem estudos ainda precisos de limites para a cultura do Eucalipto.

Pela tabela 6 verificou-se que as alternativas de uso do solo ILPF e PCM não apresentam valores críticos em relação a compactação, pois estão abaixo dos limites citados anteriormente, sendo assim o desenvolvimento dessas culturas não foram comprometidos por esse fator. A FN também não sofreu riscos devido a compactação, pois está bem abaixo do

valor crítico. Isto ocorreu devido ela não ter sofrido nenhuma ação antrópica, pisoteio animal ou prática de preparo do solo.

De acordo com a tabela 6 observou-se ainda que, as alternativas de uso do solo PEX e CE apresentaram os maiores de GC, indicando uma maior alteração estrutural do solo quando comparados com a FN. Isso é um indicativo de que o pisoteio constante de animais nas referidas áreas ocasionou uma significativa mudança na estrutura do solo.

Por trabalhar com amostras deformadas, os resultados do ensaio de Proctor normal que auxiliam no cálculo do grau de compactação ainda são questionados por alguns autores, porém é um método aceito pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo como indicativo da compactação dos solos agrícolas. Embora este método se aplique com mais propriedade a estudos da Engenharia Civil, como construção de estradas e outros.

Outro ensaio realizado para quantificação da mudança estrutural do solo e para o conhecimento de sua possível compactação é a determinação da velocidade de infiltração básica (VIB). No campo é uma medida direta da velocidade de infiltração da água em condições de saturação do solo. A Tabela 6 apresenta os valores da VIB para as diferentes alternativas de uso do solo. Se considerar que antes do estabelecimento das culturas nos locais estudados toda a área era ocupada pela FN, então o solo sob este tipo de vegetação é o parâmetro de comparação. Observa-se pela tabela 6 que, todas as alternativas apresentaram valores de VIB inferiores ao da FN, indicando que a atividade antrópica interferiu na estrutura do solo. As alternativas de uso do solo CE e PEX foram as que apresentaram os menores valores de VIB, pelo fato do pisoteio animal e o não destas situações. Ao passo que nas alternativas PCM, PE e ILPF o efeito da ação antrópica pôde ser notado. A compactação do solo pode limitar a infiltração de água (ROSOLEM et al., 1994), influenciando significativamente nos valores da VIB. Ao apresentar menores valores de VIB o solo pode estar sujeito frequentemente a problemas de enxurradas no período das chuvas. Essas enxurradas podem causar erosões com arraste de partículas significativas, gerando perdas de produtividade, problema este muito frequente em solos compactados.

A resistência do solo a penetração é um dos parâmetros mais empregados atualmente no Brasil, pois permite identificar camadas compactadas no solo de um modo rápido e de fácil interpretação. Ela correlaciona-se com a umidade do solo e sua resistência possibilitando a identificação de camadas potencialmente limitante ao crescimento radicular (COLET et al., 2009). Valores de resistência a penetração do solo entre 2 MPa e 3 MPa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular de várias culturas (HAMZA e ANDERSON, 2005).

As figuras 8 a 13 apresentam as curvas provenientes das equações de regressão ajustadas da resistência do solo à penetração, para as diferentes alternativas de uso do solo estudadas.

Figura 8. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o PE.

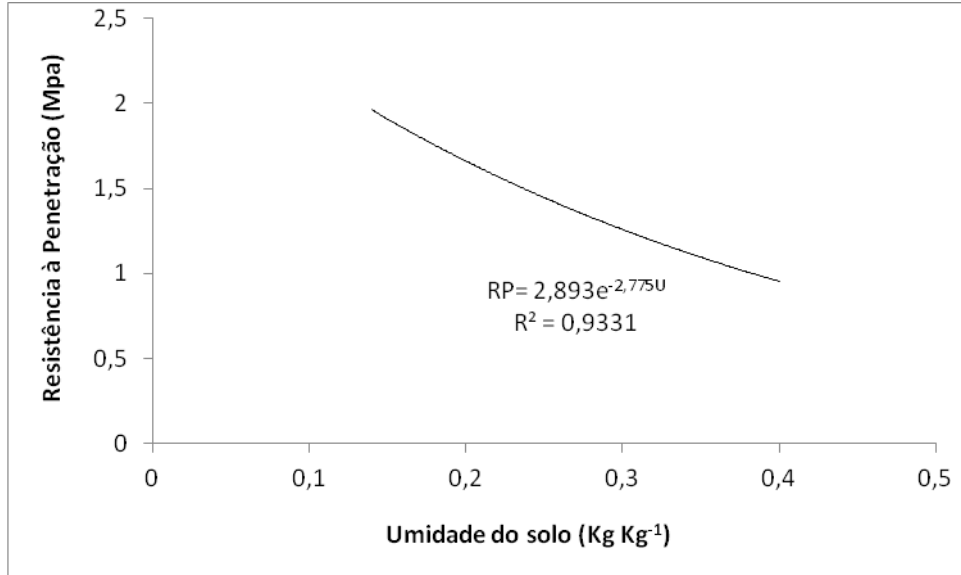


Figura 9. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para ILPF.

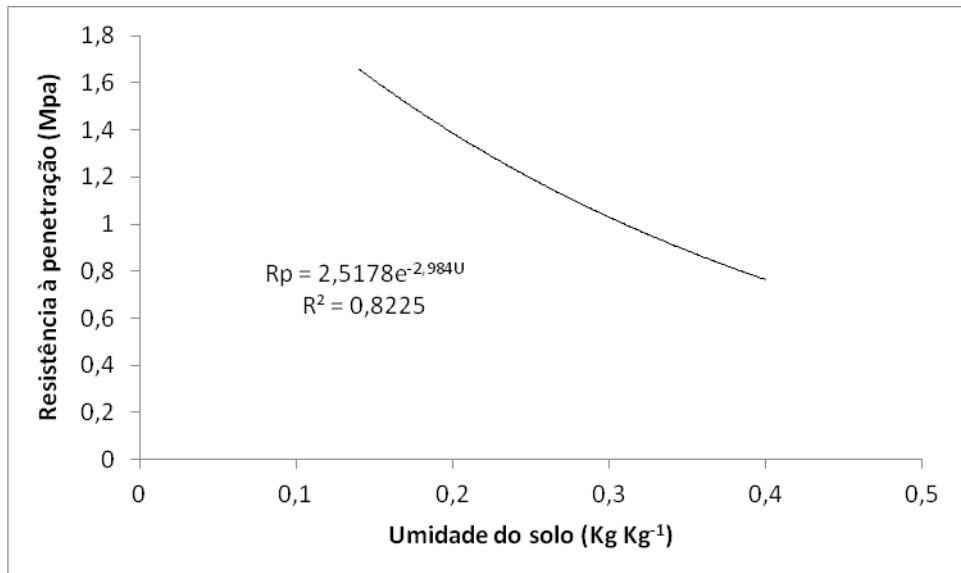


Figura 10. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o CE.

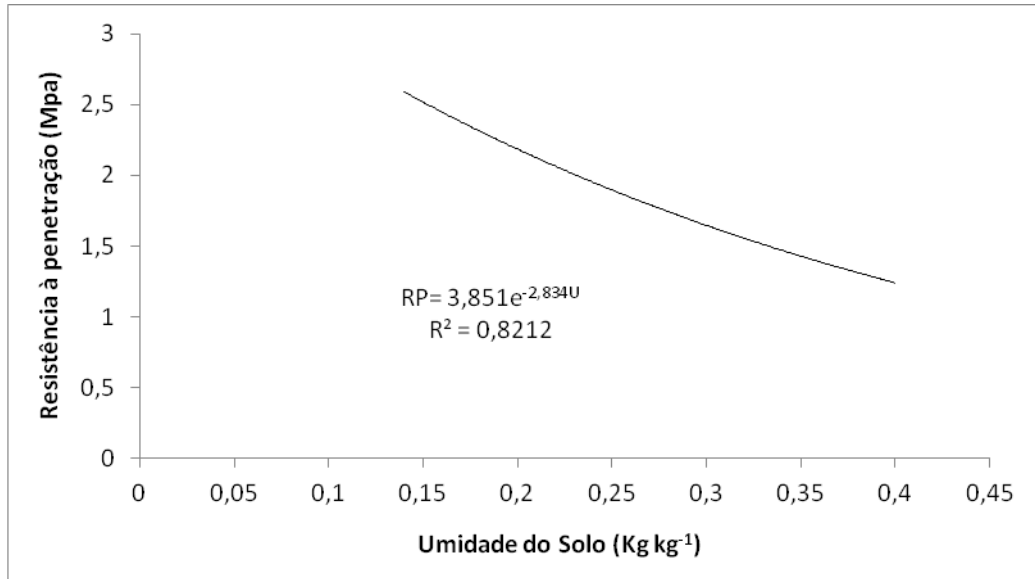


Figura 11. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o PCM.

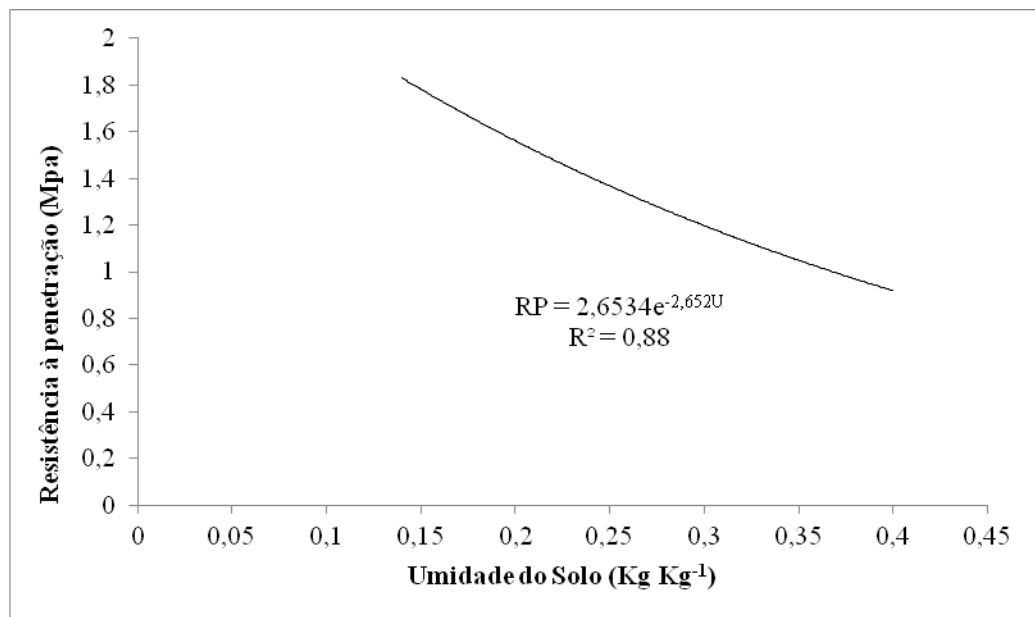


Figura 12. Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para a PEX.

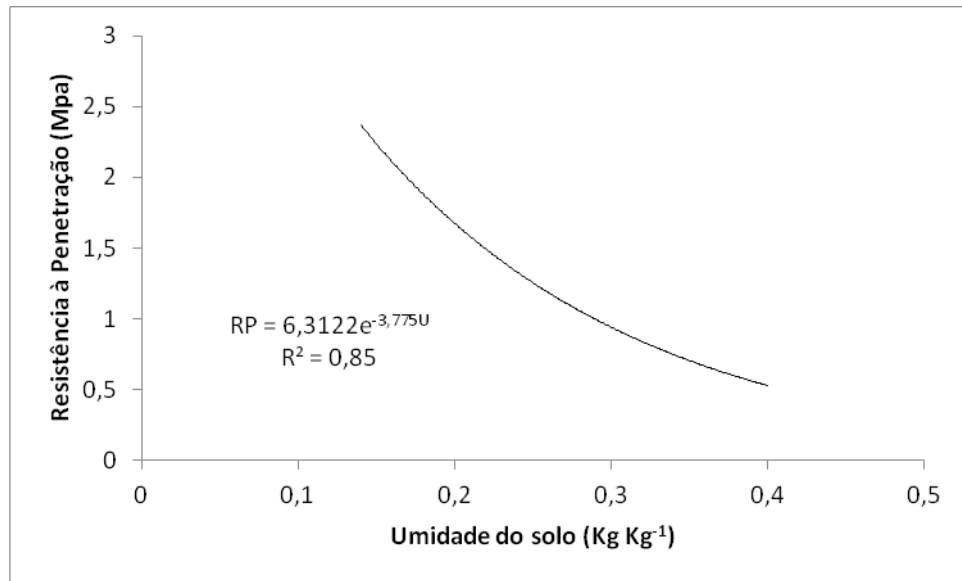
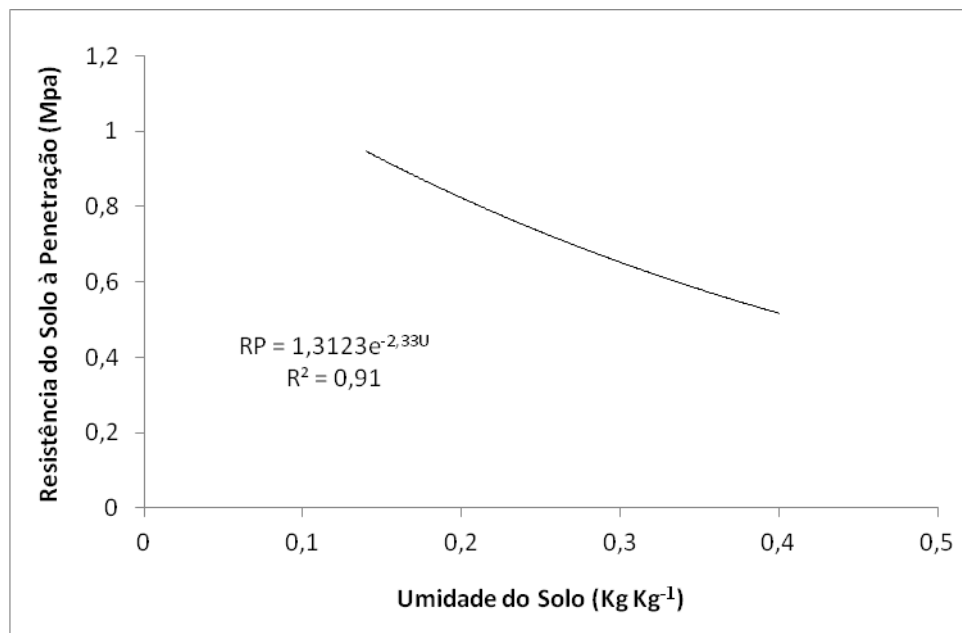


Figura 13 - Modelagem do solo à penetração versus Umidade para a FN.



Tendo sido gerados em forma exponencial, para comparações estatísticas os modelos foram transformados em retas e estas, comparadas duas a duas pelos seus coeficientes lineares e angulares de acordo com Snedecor & Cochran (1989).

Na tabela 7 observa-se que os tratamentos PE x ILPF não se diferenciaram estatisticamente entre si pelo teste de Snedecor & Cochran (1989), isso se deve por essas áreas terem a mesma classe de solo e estarem muito próximas, mesmo tendo usos diferentes.

Tabela 7. Teste de significância para a diferentes alternativas de uso do solo estudadas, de acordo com Snedecor & Cochran (1989).

Comparações entre as alternativas	Significância	
	Coefficiente linear	Coefficiente angular
PE x ILPF	ns	ns
PE x CE	*	*
PE x PCM	*	ns
PE x PEX	*	*
PE x FN	*	*
ILPF x CE	*	*
ILPF x PCM	*	*
ILPF x PEX	*	*
ILPF x FN	*	*
CE x PCM	*	*
CE x PEX	*	*
CE x FN	*	*
PCM x PEX	*	*
PCM x FN	*	*
PEX x FN	*	*

PE: Plantio de eucalipto; CE: Cerrado; ILPF: Integração lavoura pecuária floresta; PCM: Plantio convencional de milho; PEX: Pastagem extensiva FN: Floresta Nativa; * = significativo a 5%, ns = não significativo

Entretanto, todos os demais tratamentos apresentaram diferenças estatísticas. De acordo com Rocha (2003), a melhor representatividade da resistência do solo à penetração (RP) deve ser o valor na umidade correspondente à capacidade de campo, pois esse valor é influenciado pela umidade do solo. Nesse sentido, a Tabela 8 apresenta os valores de RP obtidos na Ucc. Admitindo-se o valor crítico de 2 MPa (HAMZA e ANDERSON, 2005).

Tabela 8. Valores de Resistência à Penetração (RP) na umidade correspondente à capacidade de campo, correspondente ao potencial matricial de -6 kPa (Ucc).

Usos do solo	RP (MPa)	Ucc (kg kg ⁻¹)
PE	1,22	0,31
ILPF	1,23	0,32
CE	2,08	0,30
PCM	1,19	0,30
PEX	2,42	0,30

FN	0,84	0,33
----	------	------

PE: Plantio de eucalipto; CE: Cerrado; ILPF: Integração lavoura pecuária floresta; PCM: Plantio convencional de milho; PEX: Pastagem extensiva FN: Floresta Nativa; RP: Resistência a penetração; Ucc: umidade correspondente à capacidade de campo.

Observou-se que as alternativas de uso do solo PEX e CE apresentaram valores acima do valor crítico, evidenciando problemas de compactação, principalmente devido ao pisoteio animal. Os menores valores de RP foram encontrados para a FN e PCM. A FN por se constituir em um sistema sem tráfego de máquinas e, ou animais e, também, por apresentar um maior conteúdo de matéria orgânica, tende a condicionar o solo a menores valores de resistência à penetração. O PCM também apresenta menores valores de resistência à penetração devido a uma estrutura mais solta do solo, em decorrência dos intensos processos de mobilização por sucessivas arações e gradagens, antes do plantio de milho anualmente.

4 CONCLUSÕES

A FN foi a alternativa de uso do solo com menor valor de densidade do solo máxima e maior valor de umidade ótima de compactação. Contudo a PEX e o CE foram as alternativas que apresentaram os maiores valores de resistência do solo à penetração e, também, para o grau de compactação. A FN foi a alternativa que apresentou o maior valor de VIB e, por sua vez, o CE e PEX os que apresentaram os menores valores destes indicadores. Portanto, devido aos seus usos extensivos e pisoteio animal as alternativas que apresentaram as maiores modificações estruturais em relação à FN foram a PEX e o CE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGÓN, A.; GARCÍA, M.G.; FILGUEIRA, R.R.; PACHEPSKY, Y.A.A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. **Soil Till. Res.**, 56:197- 204, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00144-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00144-6)
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; HUNTER, E.A. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. **Soil Till. Res.**, 57:83-91, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00145-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00145-8)
- BARBOSA, L. C. *et al.* Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104 2019.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2006. 36p.
- CARVALHO, R.C.R.; ROCHA, W.W.; PINTO, J.C.; PIRES, B.S.; DIAS JÚNIOR, M.S.; NUNES, A.H.B. Soil shear strength under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, 631-638, 2010.
- COLET, M.J.; SVERZUT, C.B.; WEIRICH NETO, P.H.; SOUZA, Z.M. Alterações em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. **Ciência Agrotecnológica**, v. 33, p. 361-368, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000200001>.
- COLOMBI, T.; KELLER, T. Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 156-161, 2019.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. p.545-566.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. 2017. 573 p.
- FERREIRA, C.J.B. *et al.* Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-14, 21 fev. 2020.
- HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71-85, 2000.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction incropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.**, 82:121-145, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, n. 3/4, p. 398-406, 2010.

KOUREH, H. K. *et al.* Critical values of soil physical quality indicators based on vegetative growth characteristics of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 20, n. 2, p. 493-506, 2020.

LILI, M.; BRALTS, V.F.; YINGHUA, P.; HAN, L.; TINGWU, L. Methods for measuring soil infiltration: State of the art. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v.1, n.1, p.22-30, 2008.

LIMA, C.L.R. de *et al.* Critical values of physical attributes of an Ultisol under uses in South of Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 2, p. 1-9, 2018.

MARINS, A.C. de *et al.* Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 464-472, 2018.

MORAES, M.T. de *et al.* Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, p. 104611, 2020.

MORAES, M.T. de *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.

NEVES JUNIOR, A.F.; SILVA, A.P. da; NORONHA, N.C.; CERRI, C.C. Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.232-241, 2013.

OLIVEIRA, P. D. de *et al.* Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 1, p. 78-87, 2016.

PIRES, B.S., DIAS JÚNIOR, M.S., ROCHA, W.W., ARAÚJO JUNIOR, C.F., CARVALHO, R.C.R. (2012). Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(2), 635-642. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000200032>.

Raghavan, G. S. V.; Alvo, P.; Mckyes, E. Soil compaction in agriculture: A review toward managing the problem. *Advances in Soil Sciences*, v.11, p.1-36, 1990.

RAIJ BVAN, QUAGGIO J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1983. 31p. (IAC. Boletim técnico, 81).

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Soil, plant and atmosphere: concepts, processes and applications**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2020. *E-book* (456 p.).

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, 2009.

RIVERA, M. *et al.* Soil compaction induced changes in morpho-physiological characteristics of common bean. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 217-227, 2019.

ROCHA, W.W. Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG. 2003, 101p. (**Tese de doutorado**) Universidade Federal de Lavras - Lavras, MG.

ROCHA, W.W., BORGES, S.R., VICTÓRIA, E.P., NUNES, A.B. (2007). Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental. In M. H. N. Abreu (Ed.), *Ciências Ambientais: abordagem multidisciplinar* (pp. 87-124.). Belo Horizonte: UEMG.

ROSSETTI, K. D. V.; CENTURION, J. F. Ensaio de compactação em Latossolo cultivado com milho sob diferentes períodos de adoção de tipos de manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 4, p. 499-505, 2015.

ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H. & MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:491-497, 1994.

SÁ, M. A. C. de; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos. Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 25 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 136)

SANTOS, A.G.; DIAS JÚNIOR, M.S.; GUIMARÃES, T.G.P.; FURTINI NETO, E.A. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência Agrotec.**, Lavras, v. 29, n.4, p. 740-752, jul/ago.,2005

SHAH, A. N. *et al.* Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056-10067, 2017

SILVA, B.P. Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um latossolo sob diferentes usos MG. 2007, 66p. (**Dissertação de mestrado**) Universidade Federal de Lavras - Lavras, MG.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 8.ed. Ames, Iowa State University, 1989. 503p.

SOMASUNDARAM, J. *et al.* Effect of contrasting tillage and cropping systems on soil aggregation, carbon pools and aggregate-associated carbon in rainfed Vertisols. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 5, p. 879-891, 2018.

SOUZA, R.O.; PORTELA, J.C.; MARTINS, C.M.; DIAS, N.S.; CAVALCANTE, J.S. J.; SILVA, J.F.; SÁ, F.V.S. Soil attributes in agricultural uses and in the Semiarid RN-Brazil in eutrophic Cambisol. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 37, p. 3636-3643, 2015

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; VILLAR, O.M. Compactação do solo. In: **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**. São Paulo, USP, 1981. p. 81-93.

SUZUKI, L. E. A. S. *et al.* Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159-1167, 2007.

TRENTIN, R. G. *et al.* Soybean productivity in Rhodic Hapludox compacted by the action of furrow openers. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, n. 1, p. 1-9, 2018.

ARTIGO 3

Artigo elaborado de acordo com a NBR 6022:2018

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO EM PARES DE ÁREAS CAFEEIRAS EM COMPARAÇÃO COM A FLORESTA NATIVA

PHYSICAL CHARACTERIZATION OF THE SOIL IN PAIRS OF COFFEE GROWING AREAS COMPARED TO THE NATIVE FOREST

RESUMO

Minas Gerais é o maior produtor de café do país e a safra mineira corresponde à metade da produção nacional. Somente no estado, há uma área de produção equivalente a 1,1 milhão de hectares, o que corresponde a aproximadamente 58,2% da área em produção no país. Devido ao uso intensivo do solo isso pode levar à perda da sua qualidade física, com impactos negativos promovendo a sua compactação e conseqüentemente a perda de produtividade. Com isso estudos realizados através dos atributos físicos do solo, podem correlacionar positivamente contra esse fator e diminuir os danos causados pelo excesso da tráfegabilidade de máquinas. A coleta das amostras e ensaios de campo ocorreram no município de Santo Antônio do Amparo – MG, em duas fazendas cafeeiras NKG e Samambaia. Nessas fazendas foram selecionadas 5 pares de áreas, sendo cada par com uma área mais produtiva do que a outra e próximo a essas áreas foram selecionadas duas áreas de floresta nativa para que se fosse feita a comparação entre elas. A matéria orgânica é conhecida por melhorar a estrutura do solo, aumentar sua capacidade de retenção de água e nutrientes, além de fornecer nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Todas as áreas onde há uma maior produtividade, são áreas que possuem uma maior quantidade de M.O. E na avaliação da resistência a penetração de cada um desses solos observa-se que esse fator influencia diretamente na diminuição da compactação do solo, isso ocorre pois de acordo com a M.O promove uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo, deixando-o menos coeso, mais friável. Já os modelos de capacidade de carga para os pares de áreas na camada superficial 0-3 cm, o par de área SA25+SA29 apresentou uma maior capacidade de suporte de carga, seguido pelo BL+GA, B2, S4+S5, B3, C16+CA20 e a FN com a menor

capacidade em suportar cargas. Já topo do horizonte B o par de área BL+GA apresentou uma maior capacidade de suporte de carga, seguido pelo BII+BIII, SA25+SA29, FN, S4+S5 e C16+CA20 com a menor capacidade em suportar cargas.

Palavras-chave: Solo. Propriedades físicas. Matéria orgânica. Compactação do solo.

ABSTRACT

Minas Gerais is the largest coffee producer in the country and the Minas Gerais harvest accounts for half of national production. In the state alone, there is a production area equivalent to 1.1 million hectares, which corresponds to approximately 58.2% of the country's production area. Due to the intensive use of the soil, this can lead to the loss of its physical quality, with negative impacts promoting its compaction and consequently the loss of productivity. Therefore, studies carried out using the physical attributes of the soil can positively correlate against this factor and reduce the damage caused by excessive machine traffic. Sample collection and field trials took place in the municipality of Santo Antônio do Amparo – MG, on two coffee farms NKG and Samambaia. On these farms, 5 pairs of areas were selected, with each pair having one area that was more productive than the other, and two areas of native forest were selected next to these areas so that a comparison could be made between them. Organic matter is known to improve soil structure, increase its water and nutrient retention capacity, and provide essential nutrients for plant growth. All areas where there is greater productivity are areas that have a greater amount of M.O. And when evaluating the resistance to penetration of each of these soils, it is observed that this factor directly influences the reduction of soil compaction, this occurs because, according to the M.O, it promotes a decrease in the load pressure applied to the soil structure, leaving it the least cohesive, the most friable. As for the load capacity models for pairs of areas in the 0-3 cm surface layer, the area pair SA25+SA29 showed a greater load support capacity, followed by BL+GA, B2, S4+S5, B3, C16+CA20 and FN with the lowest capacity to support loads. At the top of the B horizon, the BL+GA area pair showed a greater load-bearing capacity, followed by BII+BIII, SA25+SA29, FN, S4+S5 and C16+CA20 with the lowest load-bearing capacity.

Keywords: Soil. Physical properties. Organic matter. Soil compaction.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior exportador de café no mercado mundial e ocupa a segunda posição, entre os países consumidores da bebida. O Brasil responde por um terço da produção mundial de café, o que o coloca como maior produtor mundial, posto que detém há mais de 150 anos. Conforme dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2023), a cafeicultura brasileira é uma das mais exigentes do mundo, em relação às questões sociais e ambientais, e há uma preocupação em se garantir a produção de um café sustentável.

Minas Gerais é o maior produtor de café do país e a safra mineira corresponde à metade da produção nacional. Somente no estado, há uma área de produção equivalente a 1,1 milhão de hectares, o que corresponde a aproximadamente 58,2% da área em produção no país. Segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), a safra mineira em 2023 deve alcançar 27,5 milhões de sacas. A expectativa é de que haja um crescimento de 25% na comparação com a safra anterior.

Devido a esse crescente aumento das áreas cultivadas e da produtividade o uso intensivo do solo pode levar à perda da sua qualidade física com impactos negativos sobre os agregados do solo, a resistência à penetração das raízes, a porosidade e a densidade do solo, ou seja, promovendo a sua compactação. (GUIMARÃES *et al.*, 2014).

Portanto, sistemas de manejo com alguma semelhança com as florestas, têm chamado a atenção devido à sua capacidade de reduzir perdas de nutrientes, solo e água, também contribuem para as propriedades físicas do solo (PEREZ *et al.*, 2004; WENDLING *et al.*, 2011).

A matéria orgânica do solo (MOS) é um dos principais agentes agregadores das partículas do solo (NUNES *et al.*, 2010). Um dos principais mecanismos responsáveis pela preservação da MOS em sistemas de gestão de conservação é a formação de macroagregados (PASSOS *et al.*, 2007). Além de melhor agregação, a qualidade física do solo é maior em sistemas que priorizam o aporte de matéria orgânica, por exemplo, na integração lavoura pecuária e floresta (ILPF), por promover menor densidade do solo, menor resistência à penetração das raízes e maior porosidade (CARVALHO *et al.*, 2004).

Diante do exposto objetivou-se com esse trabalho analisar as propriedades físicas (resistência a penetração das raízes e também gerando modelos de capacidade de suporte de cargas) de um latossolo submetido à pares de áreas cafeeiras e sob floresta nativa, para que se gere resultados e conheça quais ações antrópicas causarão prejuízos e danos nesses usos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A coleta das amostras e ensaios de campo ocorreram no município de Santo Antônio do Amparo – MG, em duas fazendas cafeeiras NKG e Samambaia. Nessas fazendas foram selecionadas pares de áreas, sendo uma área mais produtiva do que a outra e próximo a essas áreas foram selecionadas duas áreas de floresta nativa para que se fosse feita a comparação entre elas. Esse trabalho faz parte de um projeto de rede denominado BiosBrasil, financiado pela FAPEMIG. Portanto todos os trabalhos tiveram pontos de coletas iguais e seguindo mesmo padrão de coleta, sendo assim possível correlacionar tanto a parte física, química e biológica do solo.

Figura 14. Localização das áreas de estudo.



As comparações foram feitas entre 5 pares de áreas, Buraco do lobo (BL) x Galpão (GA); Biazus II (BII) x Biazus III (BIII); Mata NKG; sendo esses dois primeiro situados na fazenda NKG. Já os outros três pares na fazenda Samambaia, CA16 x CA20; SA25 x SA29; S4 x S5; Mata Kalunga, ou seja, 12 áreas amostrais. Nas áreas cafeeiras todas elas possuem consórcio de *brachiaria* nas entrelinhas e seus manejos de adubação também são semelhantes. Esses pares foram avaliados anteriormente um a um para que todos eles tivessem características semelhantes com o mesmo tipo de solo, nesse caso um Latossolo Vermelho típico, mesmo relevo e manejo.

Figura 15. Par de área, CA20 x CA16.



Na parte central em cada uma dessas áreas foi feita uma trincheira para que melhor representasse o talhão. Nessas trincheiras foram realizadas as coletas de 12 amostras indeformadas superficial 0-3 cm e também 12 amostras na camada subsuperficial no topo do horizonte B, 24 amostras por trincheira e um total de 288 amostras indeformadas.

As amostras indeformadas foram coletadas utilizando um amostrador Uhland com 6,4 cm de diâmetro e anéis de 2,5 cm de altura. As amostras foram embaladas em filme plástico e tratadas com parafina para preservar sua estrutura. Essas amostras indeformadas foram inicialmente preparadas retirando-se o excesso de solo dos cilindros, saturados por capilaridade, e colocados em extrator Richards, onde drenaram sob os potenciais matriciais de -6, -10, -100, -500 e -1500 kPa, e seu peso foi determinado após equilíbrio em cada potencial (KLUTE, 1986). Em seguida, essas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (DIAS JUNIOR e MARTINS, 2017), com aplicação de pressão através da utilização de ar comprimido, através do consolidometro. As pressões aplicadas às amostras foram 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa. Cada pressão foi aplicada até que 90% da deformação máxima fosse alcançada (TAYLOR, 1948). Com estes dados foram criadas curvas de compressão do solo, onde foram determinadas as pressões de pré-consolidação (σ_p).

Para obtenção dos modelos de capacidade de suporte de cargas, os potenciais foram representados no eixo das abcissas (x) e as pressões de pré-consolidação (σ_p) foram

representadas no eixo das ordenadas (y) (DIAS JUNIOR et al., 2005) utilizando o Sigma Plot 14 softwares. Esses pontos foram ajustados a uma regressão do tipo $\sigma_p = a\Psi^mb$, onde σ_p é a pressão de pré-consolidação, Ψ_m é o potencial da matriz e os parâmetros a e b representam os parâmetros empíricos obtidos no ajuste do modelo (Severiano et al., 2013). As regressões foram ajustadas através do software R, versão 4.0.3 (R Core Team, 2020), que foi aplicado aos modelos de pressão de pré-consolidação das amostras de solo. As equações estimadas do solo foram comparadas estatisticamente através do teste de Snedecor & Cochran (1989) para modelos lineares, que inclui um teste de homogeneidade dos dados (teste F), o coeficiente angular (b) e a significância do coeficiente linear (a) da equação.

O excesso de material retirado dos anéis foi utilizado como amostras deformadas. Foram secos ao ar, passados em peneira de 2,0 mm e utilizados nas seguintes análises: textura pelo método da pipeta (DAY, 1965; EMBRAPA, 2017) e, do teor de matéria orgânica (RAIJ e QUAGGIO, 1983)

Para análise estatística dos resultados, foi utilizado delineamento experimental inteiramente casualizado e utilizada análise de variância e, quando significativa, foi utilizado o teste de Scott-Knott ($p < 0,01$) para agrupamento das médias.

Para a avaliação da resistência a penetração das raízes (RP), foram selecionados 5 pontos aleatórios em cada uma das áreas, as avaliações ocorreram debaixo da saia do café e em cima do rodado na entre linha dos plantios. Essas avaliações foram feitas tanto no período seco, quanto no período chuvoso para que se note o quanto a umidade é fundamental para se realização desse diagnóstico de compactação. Em cada um dos pontos que foram feitas as medições de RP, também foram realizadas coletas de solo para avaliar a umidade atual na camada de 0-20, 20-40 e 40-60cm.

O equipamento utilizado foi o penetrômetro de impacto modelo comercial IAA/PLANALSUCAR/Stolf, segundo método descrito por Stolf et al. (1983). O penetrômetro de impacto, também denominado de penetrômetro dinâmico, é um equipamento largamente utilizado em aplicações agrícolas para detectar camadas compactadas de solo. Apresenta como vantagens facilidade e velocidade de uso, baixo custo e forte relação com as condições físicas do solo para o crescimento do sistema radicular das plantas, além da possibilidade de medidas diretas de campo com grande número de repetições (TORMENA e ROLOFF, 1996; HERRICK e JONES, 2002; NAIME et al., 2006). Sua desvantagem é a dependência de outros atributos do solo, a exemplo da umidade no momento da medida, textura, densidade do solo,

estrutura, matéria orgânica, presença de pedras, mineralogia da argila e sistemas de uso e manejo (GERARD et al., 1982; NEIRO et al., 2003).

Os resultados obtidos em impactos dm^{-1} foram convertidos em resistência dinâmica por meio da fórmula (Stolf, 1991):

$$RP = 5,6 + 6,89 (N)$$

em que RP é a resistência à penetração em kgf cm^{-2} e N é o número de impactos do peso metálico. Os resultados foram obtidos em kgf cm^{-2} e depois multiplicados pela constante 0,0980665 para transformação em MPa, conforme Beutler et al. (2001).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 9 apresenta a análise textural e matéria orgânica do Latossolo Vermelho típico para as diferentes áreas, que foram obtidos no Laboratório de Solos do Departamento de Ciência do Solo, da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Tabela 9. Análise textural e matéria orgânica do Latossolo Vermelho típico para as diferentes áreas.

Local	Area	Textura (g Kg^{-1})						M.O (%)	
		0-3			Topo B			0-3	Topo B
		Arg.	Sil.	Ar.	Arg.	Sil.	Ar.		
SAA	Buraco do lobo	59	21	20	68	14	18	4,55	2,87
	Galpão	49	18	33	54	11	35	3,54	2,74
	Biazus II	48	13	39	50	11	39	4,32	2,25
	Biazus III	50	24	26	60	19	21	3,60	2,14
	Samambaia 4	48	13	39	52	9	39	4,19	2,75
	Samambaia 5	41	9	49	43	7	50	3,74	2,48
	CA16	52	21	27	56	21	23	3,18	2,50
	CA20	56	24	20	63	16	21	2,47	2,01
	SA25	44	18	38	53	16	31	4,05	2,57
	SA29	42	14	44	46	13	41	3,39	2,46
	Mata NKG	45	13	42	46	10	44	5,17	2,90
	Mata Kalunga	52	20	28	53	16	31	5,38	2,60

SAA – Santo Antônio do Amparo; M.O – Matéria orgânica.

A partir da tabela 10 também podemos observar os dados de produtividade, no período de 4 anos, de cada uma das áreas estudadas.

Tabela 10. Dados de produtividade dos últimos 4 anos fornecidos pelas respectivas fazendas.

Pares	Área	Total geral (Sacas/ha)
1	Samanbaia 5	58,26
	Samanbaia 4	57,94
2	SA29	47,76
	SA25	58,00
3	Galpao	36,16
	Buraco do lobo	42,67
4	CA16	46,85
	CA20	38,27
5	Biazus III	33,40
	Biazus II	37,16

Isso significa que os dados da tabela 10, estão de acordo com a análise textural da tabela 9 e trazem que a presença de uma maior quantidade de matéria orgânica no solo pode ter sido um fator determinante para uma maior produtividade. A matéria orgânica é conhecida por melhorar a estrutura do solo, aumentar sua capacidade de retenção de água e nutrientes, além de fornecer nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (CUNHA *et. al*, 2009; KLEIN e KLEIN, 2015; SILVA *et. al*, 2023). Portanto, os resultados indicam que é importante promover práticas agrícolas sustentáveis que visem aumentar a quantidade de matéria orgânica no solo, a fim de alcançar uma produtividade mais elevada.

Além disso, presença de maior quantidade e volume de *Brachiaria* sp. na entrelinha também pode está relacionada com os resultados apresentados nas tabelas 9 e 10 (como não foram realizadas as medições desses volumes de material verde e seco a análise estatística não foi realizada). Nessas tabelas, observamos que a quantidade de matéria orgânica (M.O) no solo e a produtividade estão aumentadas quando há uma maior cobertura vegetal. Esses resultados corroboram com Silva et al. (2023), que afirmou que a adubação verde, ou seja, o uso de plantas como cobertura do solo, traz benefícios tanto para a química quanto para a estrutura física do solo, resultando em uma produtividade maior das culturas. Portanto,

podemos concluir que a presença de *Brachiaria* sp. na entrelinha contribui para a melhoria das propriedades do solo (CARDUCCI e OLIVEIRA, 2021) e aumenta a produtividade das culturas (GUERRA *et. al.*, 2021).

A figura 16 mostra claramente que há uma diferença no volume de *brachiaria* sp. entre as parcelas SA25 e SA29. Na parcela SA25, o volume é maior, o que reforça o que foi apresentado nas tabelas 9 e 10.

Figura 16. Par de área SA25 x SA29.



A compactação do solo é uma importante causa de perdas de produtividade, em razão de modificações físicas no ambiente radicular. Essas alterações englobam a redução das disponibilidades de oxigênio e de água e o aumento da resistência do solo ao crescimento radicular (DEBIASI *et al.*, 2010).

As figuras 17 ao 21 apresentam os resultados obtidos das avaliações de resistência do solo à penetração do solo no período seco, para os diferentes pares estudados e tendo a Floresta nativa como referência em cada uma dessas áreas. Ou seja, mostram como os diferentes comportamentos do solo de cada uma dessas áreas, se comparam à Floresta nativa em termos de resistência do solo à penetração, permitindo uma avaliação do impacto de cada uma delas na qualidade do solo.

- Fazenda NKG:

Figura 17. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para o par de área BL x GA, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades

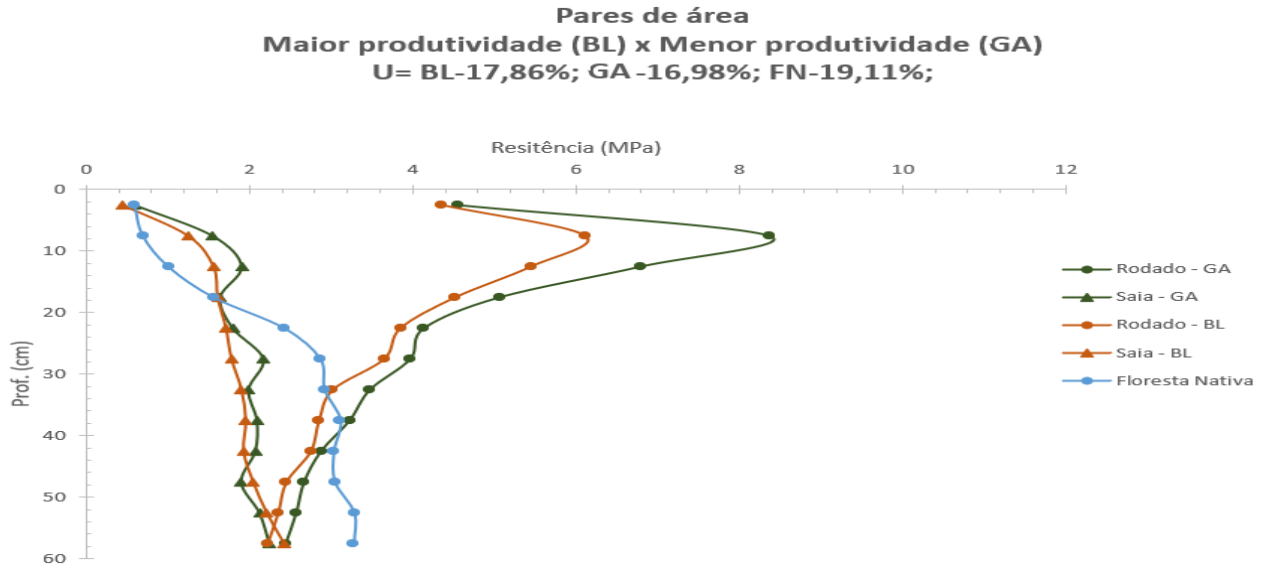
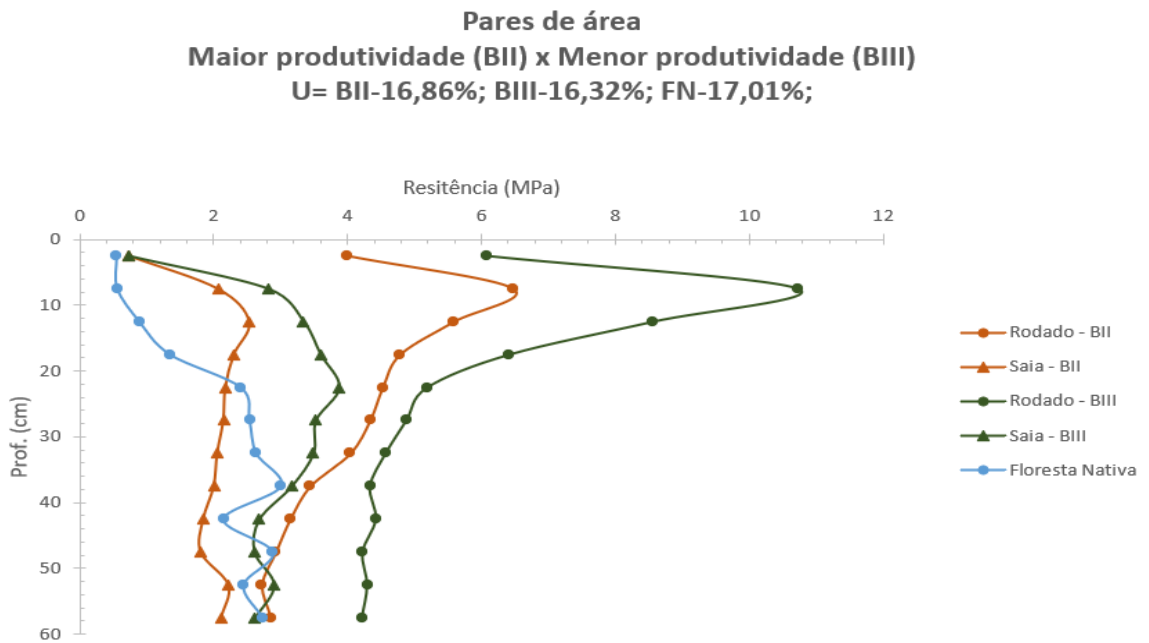


Figura 18. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área BII x BIII, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.



- Fazenda SAMAMBAIA:

Figura 19. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área S5 x S4, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.

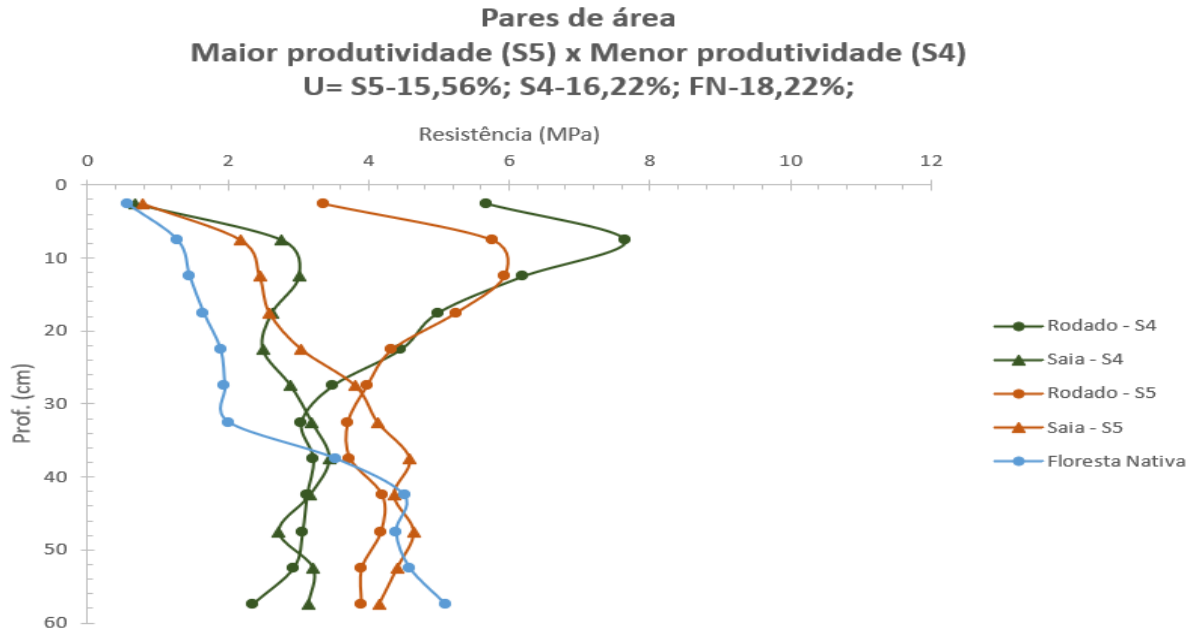


Figura 20. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área CA16 x CA20, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.

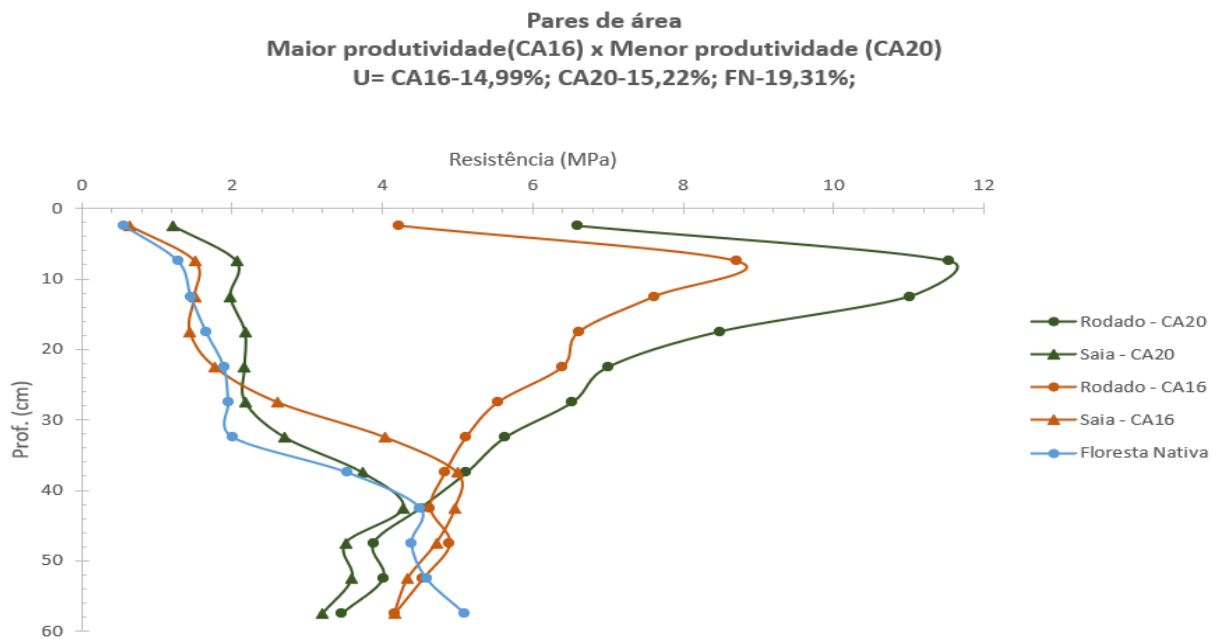
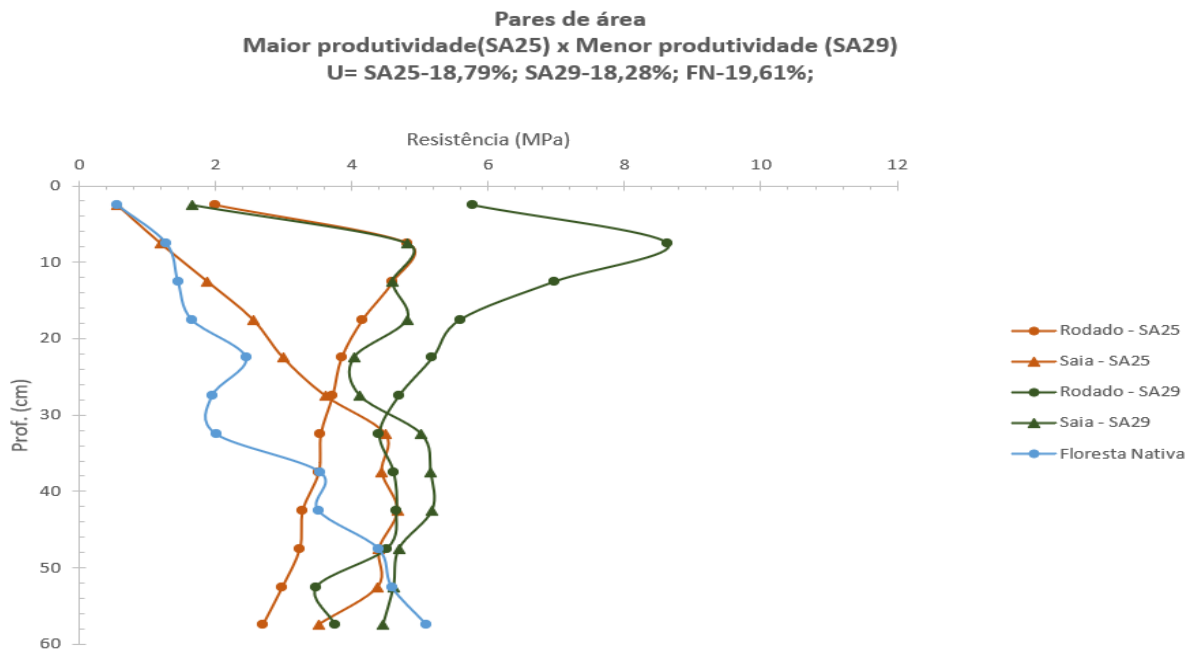


Figura 21. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área SA25 x SA29, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.



Já as figuras 22 ao 26 apresentam os resultados obtidos das avaliações de resistência do solo à penetração do solo no período chuvoso, para os diferentes pares estudados e tendo a Floresta nativa como referência em cada uma dessas áreas.

- Fazenda NKG:

Figura 22. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área BL x GA, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.

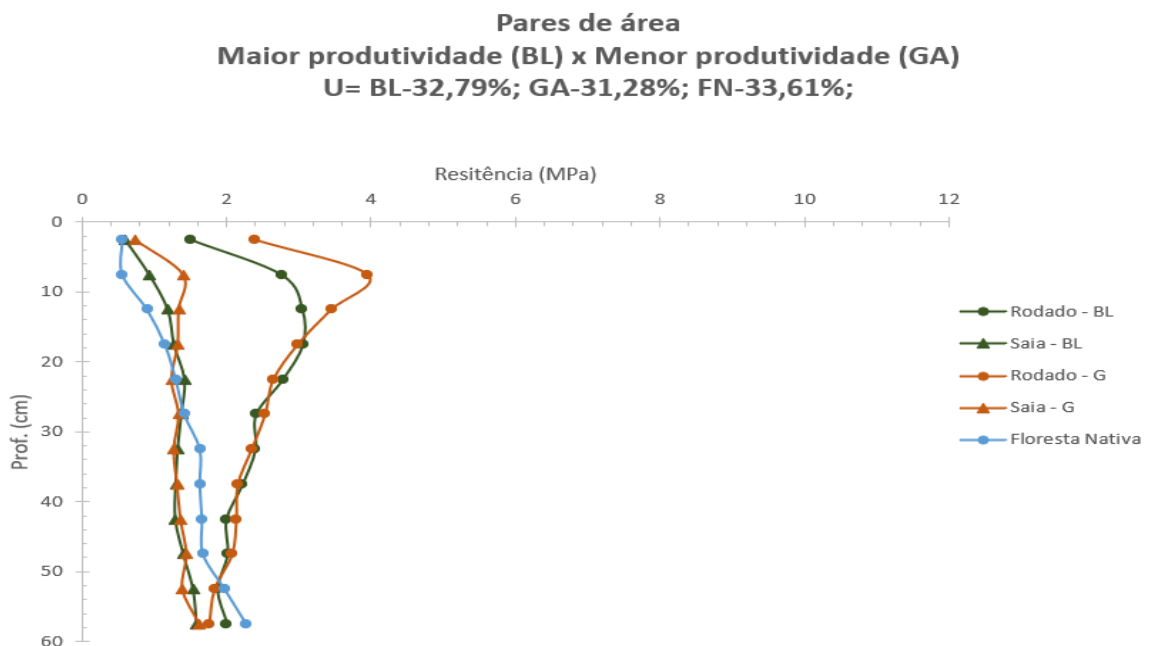
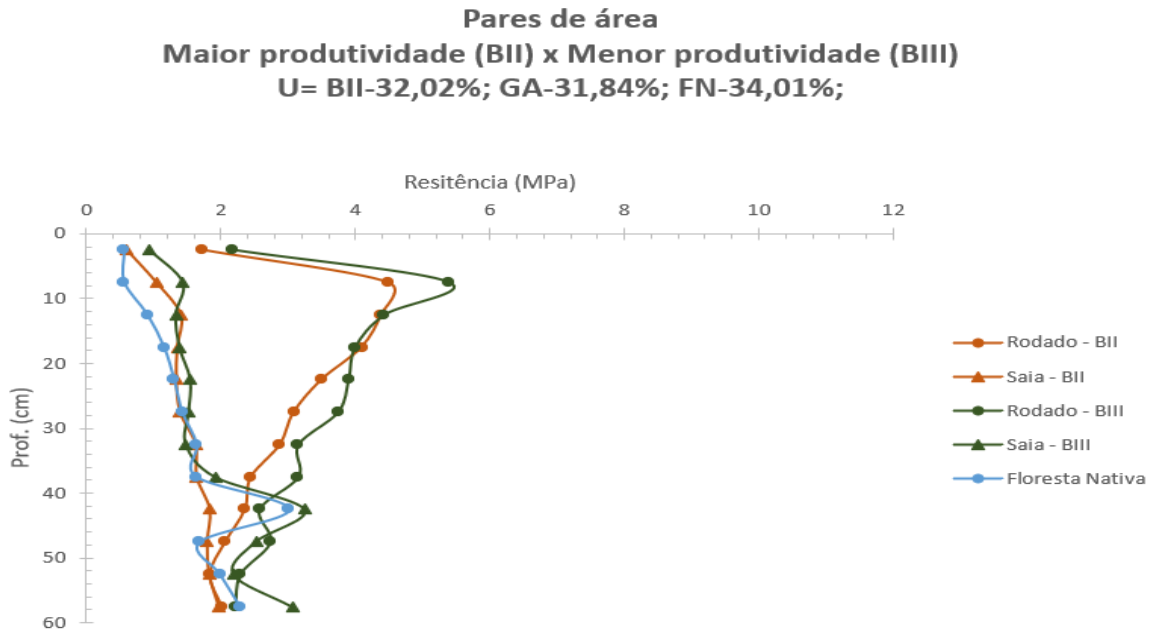


Figura 23. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área BII x BIII, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.



• Fazenda SAMAMBAIA:

Figura 24. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área S5 x S4, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.

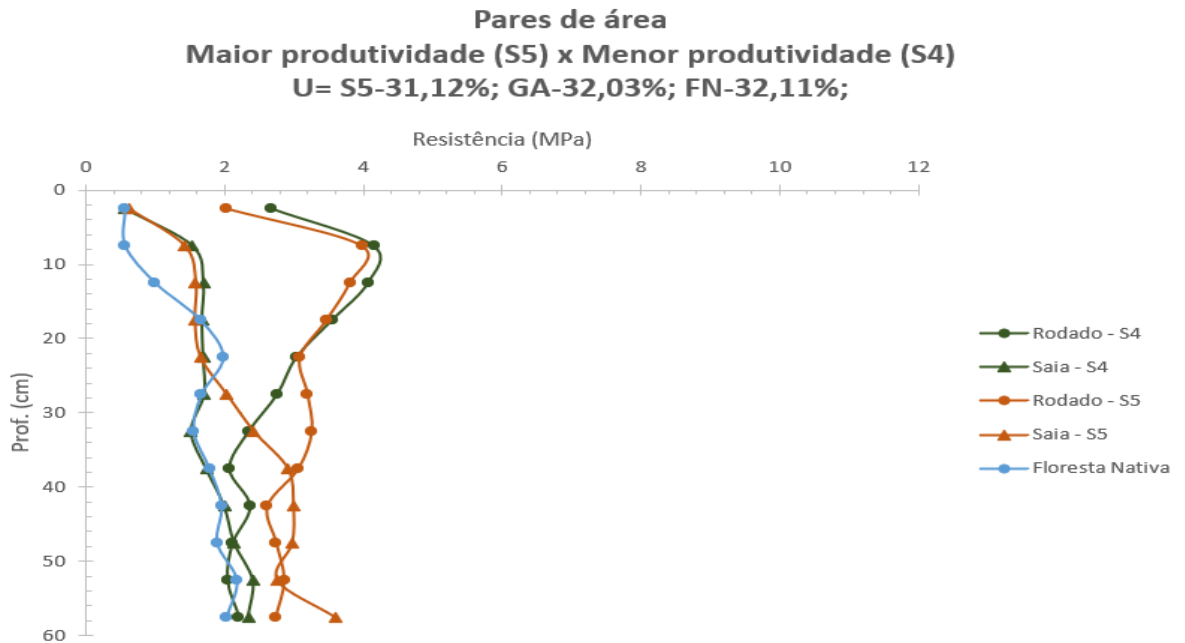


Figura 25. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área CA16 x CA20, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.

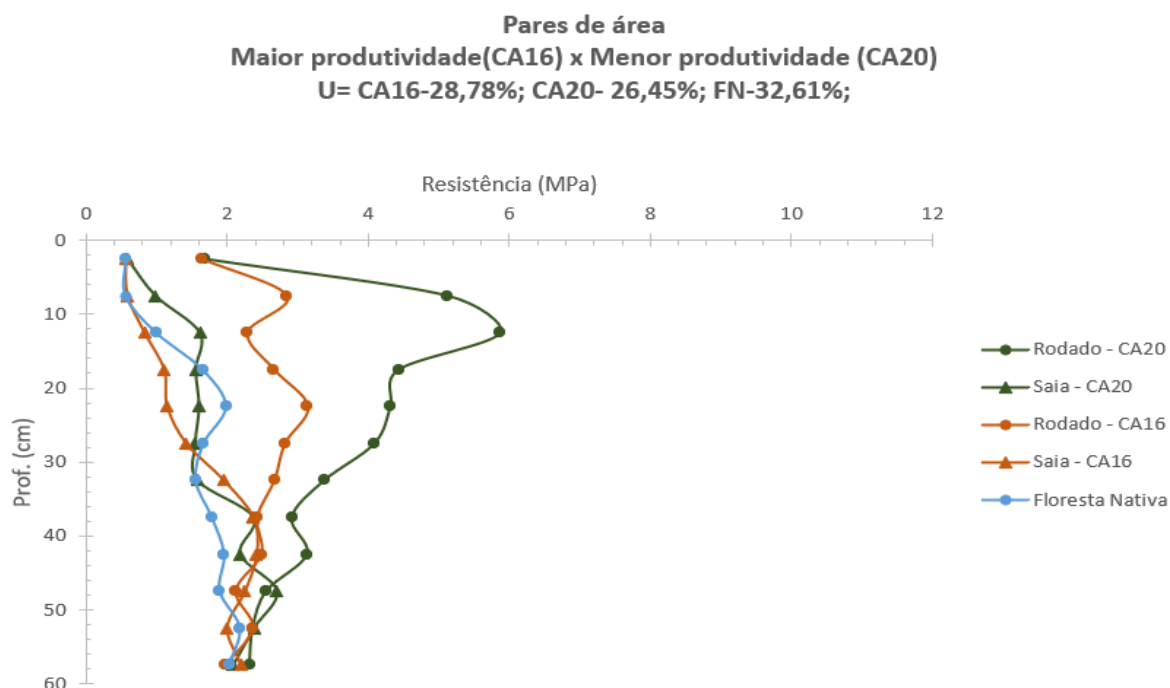
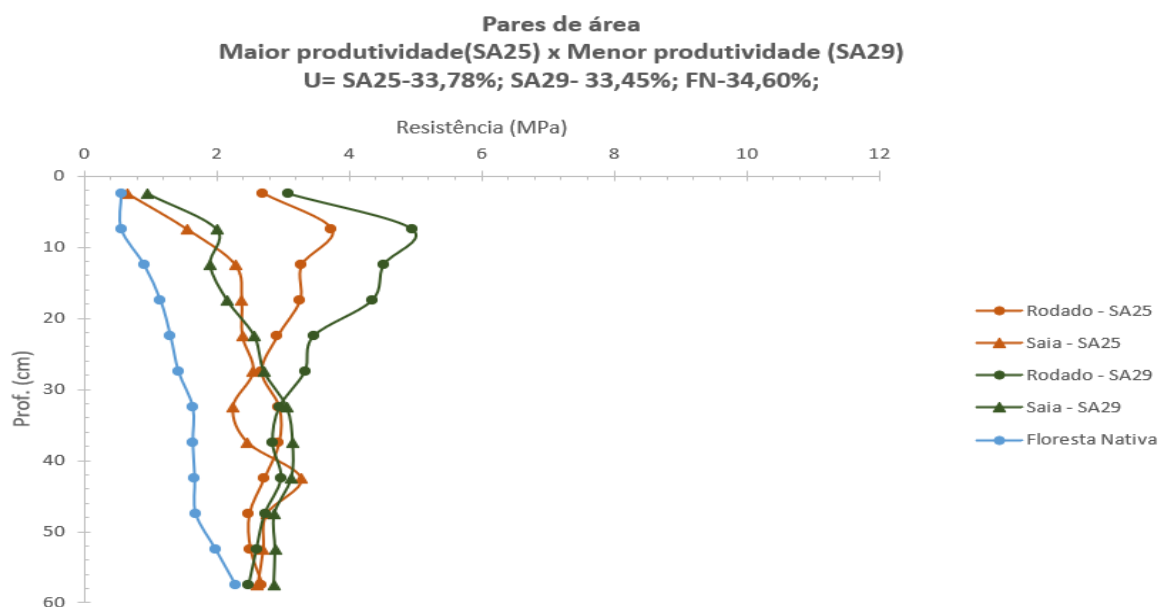


Figura 26. Representação gráfica dos diagnósticos de compactação para a par de área SA25 x SA29, Floresta nativa como referência e suas respectivas umidades.



Para uma análise completa dos pares, todas as áreas foram comparadas com a Floresta nativa. Nesse sentido usa se a FN pois é uma área onde não sofreu danos e nem

modificações antrópicas ao longo dos anos refletindo o que seria a condição ótima para o desenvolvimento das culturas. Esse fato é evidenciado pela avaliação no período úmido pois segundo Rocha (2003), a melhor representatividade da resistência do solo à penetração deve ser o valor na umidade correspondente à capacidade de campo, pois esse valor é influenciado pela umidade do solo. E outro fator que se torna possível a correlação desse ponto de avaliação com a Floresta nativa são realizados na saia do café mais precisamente entre plantas, ou seja, uma área onde não sofre pressão dos rodados nem o peso das máquinas ao longo dos anos, o que os torna semelhantes.

A resistência do solo a penetração é um dos parâmetros mais empregados atualmente no Brasil, pois permite identificar camadas compactadas no solo de um modo rápido e de fácil interpretação. Ela correlaciona-se com a umidade do solo e sua resistência possibilitando a identificação de camadas potencialmente limitante ao crescimento radicular (COLET et al., 2009). Valores de resistência a penetração do solo entre 2 Mpa, 3 MPa ou acima são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular de várias culturas (HAMZA e ANDERSON, 2005).

A partir do diagnóstico de compactação feito onde se encontra o caminho das máquinas na entrelinha, ou seja, nos rodados, nota-se que em todas as áreas tanto no período seco quanto no período chuvoso temos um sinal claro de compactação do solo, devido ao excesso de trafegabilidade e peso das máquinas corroborado por Lima e Leite (2014).

Essa compactação do solo nos rodados das máquinas na entrelinha pode ter consequências negativas para a agricultura, ou seja, prejudicando o desenvolvimento das raízes das plantas, reduzindo sua capacidade de absorver nutrientes (Gurgel et al., 2020) e água (Silva, 2021). Sendo assim, medidas adequadas devem ser adotadas para minimizar seus efeitos negativos. Uma delas é reduzir a trafegabilidade das máquinas também evidenciado por Martins *et. al* (2012), especialmente em períodos chuvosos, quando o solo está mais susceptível à compactação, limitando o número de passadas na entrelinha. Andrade *et. al* (2017) em um estudo sobre operações de colheita evidencia a correlação direta com o número de passadas e a compactação do solo.

Na avaliação da resistência a penetração de cada um desses solos observa-se que esse tipo de manejo influencia diretamente na diminuição da compactação do solo, isso ocorre pois de acordo com Rocha *et. al* (2007) a M.O promove uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo, deixando-o menos coeso, mais friável.

Dessa forma, é possível observar uma relação positiva entre a presença de uma maior quantidade de M.O e a espécie *Brachiaria* sp. com a produtividade das áreas. Esses fatores contribuem para a melhoria das condições do solo e do ambiente para o crescimento das plantas, resultando em maiores índices de produção (CARDUCCI e OLIVEIRA, 2021; GUERRA *et. al*, 2021).

De acordo com a tabela 11, na comparação dos modelos de capacidade de suporte de cargas das camadas superficiais (0-3 cm) dos solos, não foram observadas diferenças entre as áreas sob os diferentes tipos de pares, e cada um desses pares foram agrupados em um único modelo. Já no par BII x BIII como não foi homogêneo a decisão foi de não agrupar esse par, e sim realizar uma modelagem para cada uma dessas áreas.

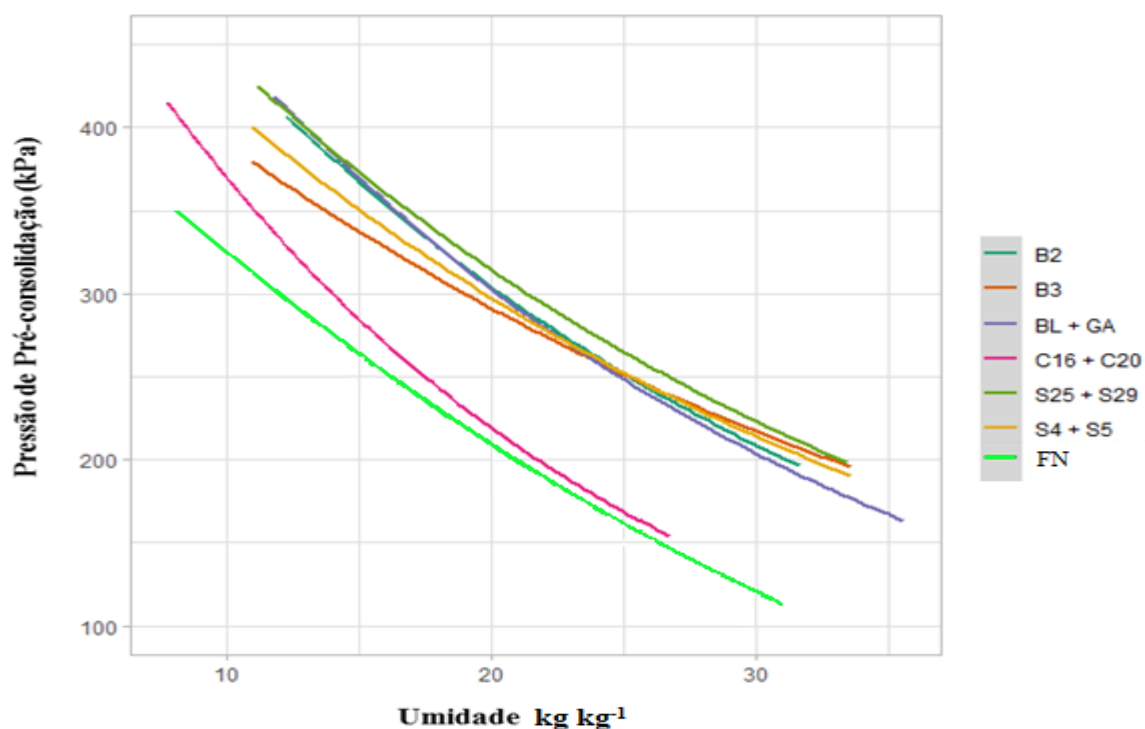
Tabela 11. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga [$s_p = 10(a + bq)$] dos pares de área para a camada superficial 0-3 cm, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Camadas	Homogeneidade dos dados	Coefficiente angular (a)	Intercepto (b)	Decisão
BL x GA	Homogêneo	NS	NS	Agrupar
BII x BIII	Não homogêneo	NS	NS	Não Agrupar
S4 x S5	Homogêneo	NS	NS	Agrupar
C16 x C20	Homogêneo	NS	NS	Agrupar
SA25 x SA29	Homogêneo	NS	NS	Agrupar
MNKG + KA	Homogêneo	NS	NS	Agrupar

NS = não significativo

A figura 27 apresenta os modelos de capacidade de carga para os pares de áreas na camada superficial 0-3 cm. O par de área SA25+SA29 apresentou uma maior capacidade de suporte de carga, seguido pelo BL+GA, B2, S4+S5, B3, C16+CA20 e a FN com a menor capacidade em suportar cargas devido ao maior conteúdo de M.O deste último ambiente (Tabela 9), uma vez a M.O promover uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo e com menor capacidade de suportar cargas (PIRES *et al.*, 2012).

Figura 27. Modelos de capacidade de suporte de carga na camada superficial para os pares de área e Floresta nativa.



Ja a tabela 12, traz a comparação dos modelos de capacidade de suporte de cargas das camadas topos do horizonte B dos solos. Não foram observadas diferenças entre as áreas sob os diferentes tipos de pares, e cada um desses pares foram agrupados em um único modelo.

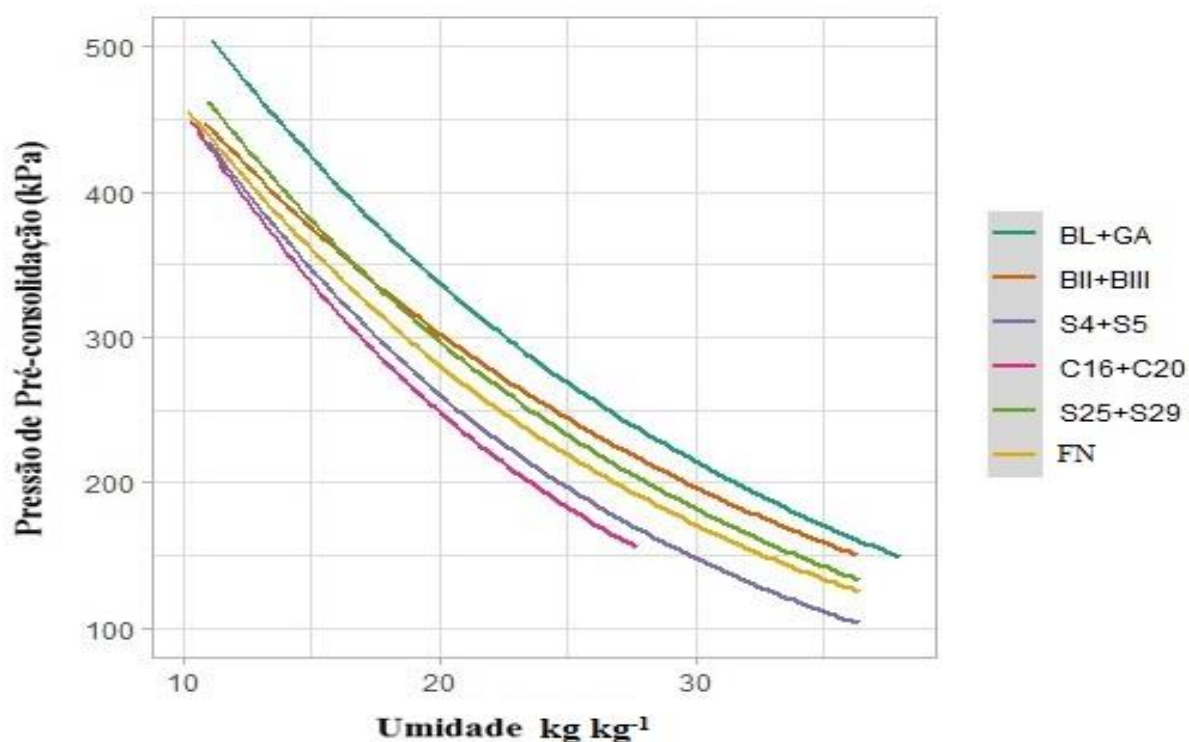
Tabela 12. Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga [$s_p = 10(a + bq)$] dos pares de área para a camada topo do horizonte B, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Camadas	Homogeneidade dos dados	Coefficiente angular (a)	Intercepto (b)	Decisão
BL x GA	Homogéneo	NS	NS	Agrupar
BII x BIII	Homogéneo	NS	NS	Agrupar
S4 x S5	Homogéneo	NS	NS	Agrupar
C16 x C20	Homogéneo	NS	NS	Agrupar
SA25 x SA29	Homogéneo	NS	NS	Agrupar
MNKG + KA	Homogéneo	NS	NS	Agrupar

NS = não significativo

A figura 28 apresenta os modelos de capacidade de carga para os pares de áreas na camada subsuperficial no topo do horizonte B. O par de área BL+GA apresentou uma maior capacidade de suporte de carga, seguido pelo BII+BIII, SA25+SA29, FN, S4+S5 e C16+CA20 com a menor capacidade em suportar cargas.

Figura 28. Modelos de capacidade de suporte de carga na camada do topo do Horizonte B para os pares de área e Floresta nativa.



A tabela 13 traz os coeficientes de determinação R² para os pares de modelos variaram entre 0,73 e 0,97. Os parâmetros de ajuste da regressão “a” e “b” variaram, respectivamente, de 2,62 a 2,86 e de 0,0115 a 0,0178 na camada de superficial 0-3 cm; e no Topo do B cm de 2,79 a 2,94 e de 0,186 a 0,265. Os valores do parâmetro “a” e “b” foram um pouco maiores no topo do B. Um parâmetro “a” maior, indica uma maior pressão de pré-consolidação, principalmente quando o solo está seco. Isto está de acordo com o comportamento geral da argila, que sofre um fortalecimento considerável das ligações partícula a partícula quando seca (AJAYI et al., 2010; AJAYI et al., 2013).

Tabela 13. Coeficientes lineares e angulares dos modelos de capacidade de suporte de carga para os pares de áreas e Floresta nativa.

Ambiente	Camada	Coef a	Coef b	Coef determinação R²
BL+GA	Superficial	2,82	0,0172	0,73
BII	Superficial	2,81	0,0163	0,91
BIII	Superficial	2,76	0,0127	0,80
S4+S5	Superficial	2,76	0,0142	0,83
CA16+CA20	Superficial	2,72	0,0152	0,79
SA25+SA29	Superficial	2,86	0,0178	0,78
FN (MNKG+ KA)	Superficial	2,62	0,0115	0,79
BL+GA	Topo do B	2,94	0,0197	0,87
BII+BIII	Topo do B	2,93	0,0186	0,97
S4+S5	Topo do B	2,84	0,0245	0,95
CA16+CA20	Topo do B	2,79	0,0265	0,88
SA25+SA29	Topo do B	2,89	0,0212	0,87
FN (MNKG+ KA)	Topo do B	2,86	0,0214	0,93

Contudo os modelos de capacidade de suporte de cargas são excelentes saídas para que se possa ter um manejo corretivo e preventivo, evitando assim danos físicos, principalmente causados na estrutura do solo. Ou seja, a pressão de pré-consolidação obtida através desses modelos é a única ferramenta onde conseguimos definir quantitativamente um valor limite para que não haja a compactação do solo.

4 CONCLUSÕES

Através do presente estudo notou-se que uma maior quantidade de matéria orgânica no solo contribui para a melhoria das propriedades físicas do solo e um aumento da produtividade das culturas. As avaliações de resistência a penetração, realizadas na saia do café no período úmido, foram as que mais se aproximaram da FN devido essas áreas não sofrerem nenhuma interferência da trafegabilidade das máquinas. Nas áreas dos rodados todos os diagnósticos feitos evidenciaram sinais de compactação do solo, devido a alta trafegabilidade das máquinas. Já os modelos de capacidade de carga para os pares de áreas na camada superficial 0-3 cm o par SA25+SA29 apresentou uma maior capacidade de suporte de carga, seguido pelo BL+GA, B2, S4+S5, B3, C16+CA20 e a FN com a menor capacidade em suportar cargas. No Topo do B o par BL+GA apresentou uma maior capacidade de suporte de carga, seguido pelo BII+BIII, SA25+SA29, FN, S4+S5 e C16+CA20.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AJAYI, A. E. et al. Assessment of vulnerability of Oxisols to compaction in the Cerrado region of Brazil. **Pedosphere**, 20(2):252-260, 2010.
- AJAYI, A. E. et al. Compressive response of some agricultural soils influenced by the mineralogy and moisture. **International Agrophysics**, 27:239-246, 2013.
- ANDRADE, M. L. C., TASSINARI, D., DIAS JUNIOR, M. S., MARTINS, R. P., ROCHA, W. W., & SOUZA, Z. R. Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, 41(2), 191–200, 2017. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017412036216>
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:167-177, 2001.
- CARDUCCI, C.E.; OLIVEIRA, G.C. **Manejo do solo na cafeicultura: produtividade e sustentabilidade**. Lavras: Editora UFLA, 135p, 2021.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W.J. & ARMANDO, M.S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesq. Agropec. Bras.**, 39:1153-1155, 2004.
- COLET, M.J.; SVERZUT, C.B.; WEIRICH NETO, P.H.; SOUZA, Z.M. Alterações em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. **Ciência Agrotecnologica**, v. 33, p. 361-368, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000200001>.
- Companhia Nacional De Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento de safra brasileiro – café: terceiro levantamento**, setembro 2023 – safra 2022/2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em: 15 set. 2023.
- CUNHA, T.J.F.; MADARI, B.E.; CANELAS, L.P.; RIBEIRO, L.P.; BENITES, V.M.; SANTOS, G.A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.85-93. 2009.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison: **American Society of Agronomy**, 1965. p.545-566.
- DEBIASI H, LEVIEN R, TREIN C.R, CONTE O. & KAMIMURA K.M. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 45:603-612, 2010.
- DIAS JUNIOR, M. S., & MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In P. C. Teixeira, G. K.
- DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; & ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Sci. Agric.**, 62(3), 248–255, 2005. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162005000300008>

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. 2017. 573 p.

GERARD, C.J.; SEXTON, P. & SHAW, G. Physical factors influencing soil strength and root growth. **Agron. J.**, 74:875-879, 1982.

GUERRA, A. F.; SANTOS, J. F.; FERREIRA, L. T. & ROCHA, O. C. **Cafés do Brasil: Pesquisa, sustentabilidade e inovação**. Tecnologias Poupa-Terra, EMBRAPA, Brasília. p. 63-75, 2021.

GUIMARÃES, G. P. *et al.* Soil aggregation and organic carbon of oxisols under coffee in agroforestry systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.278-287, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100028>

GURGEL, A.L.C.; SANTANA, J.C.S.; THEODORO, G.F.; DIFANTE, G.S.; ALMEIDA, E.M.; ARCANJO, A.H.M.; COSTA, C.M.; COSTA, A.B.G. & FERNANDES, P.B. Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, 22(1): 13-29, 2020

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil Till. Res.**, 82:121-145, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

HERRICK, J.E. & JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 66:1320-1324, 2002.

KLEIN, C. & KLEIN, V. A. Strategies to improve the retention and availability of soil water. **Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental**, 19(1), 21–29, 2015. <https://doi.org/10.5902/2236117014990>

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In A. KLUTE (Ed.), *Methods of soil analysis*. **American Society of Agronomy**. 563–396, 1986.

LIMA, J. S. S.; LEITE A. M. P. Mecanização. In: Machado, C. C. **Colheita Florestal**. 3 ed. Viçosa, MG: UFV, 2014. cap 2, p. 42-72.

MARTINS, P. C. C., DIAS JUNIOR, M. DE S., ANDRADE, M. L. DE C., & GUIMARÃES, P. T. G. Compaction caused by mechanized operations in a Red- Yellow Latosol cultivated with coffee over time. **Ciência E Agrotecnologia**, 36(4), 391–398, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542012000400002>

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Projeções do Agronegócio, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2022-2023-a-2032-2033.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2023.

NAIME, J.M.; JUNIOR. J.F.; RABELO, L.M. & VAZ, C.M.P. Penetrômetro dinâmico automatizado - Boletim Técnico 79, Versão eletrônica. São Carlos, Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2006.

NEIRO, E.S.; MATA, J.D.V.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; PINTRO, J.C. & COSTA, J.M. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distroférrico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Sci. Agron.**, 25:19-25, 2003.

NUNES, L.A.P.L.; DIAS, L.E.; JUCKSCH, I. & BARROS, N.F. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de Minas Gerais. **Biosci. J.**, 26:71-78, 2010.

PASSOS, R.R.; RUIZ, H.A.; CANTARUTTI, R.B. & MENDONÇA, E.S. Carbono orgânico e nitrogênio em agregados de um Latossolo Vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:1109-1118, 2007.

PEREZ, A.M.M.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S. & COSTA, L.M. Impactos da implementação de um sistema agroflorestal com café na qualidade do solo. **Agropec. Técn.**, 25:25-36, 2004.

PIRES, B. S.; DIAS JÚNIOR, M. S.; ROCHA, W. W.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; CARVALHO R. C. R. Modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:635-642, 2012.

R Core Team. *R versão 4.0.3* (4.0.3). The R Foundation for Statistical Computing Platform: x86_64-w64-mingw32/x64 (64-bit). 2020. <https://cran.r-project.org/>

RAIJ BVAN, QUAGGIO J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Boletim técnico, 81. Campinas: IAC, 31p, 1983.

ROCHA, W.W. Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG. 2003, 101p. (**Tese de doutorado**) Universidade Federal de Lavras - Lavras, MG.

ROCHA, W.W., BORGES, S.R., VICTÓRIA, E.P., NUNES, A.B. Resistência ao cisalhamento do solo do ponto de vista ambiental. In M. H. N. Abreu (Ed.), **Ciências Ambientais: abordagem multidisciplinar**. Belo Horizonte: UEMG. 87-124, 2007.

SEVERIANO, E. C., OLIVEIRA, G. C, DIAS JUNIOR, M. S., CURI, N., COSTA, K. A. P., & CARDUCCI, C. E. Preconsolidation pressure, soil water retention characteristics, and texture of Latosols in the Brazilian Cerrado. **Soil Res.**, 51(3), 193–202, 2013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1071/SR12366>

SILVA, C. A., CERRI, C. E. P., DE ANDRADE, C. A., MARTIN-NETO, L., & BETTIOL, W. Matéria orgânica do solo: ciclo, compartimentos e funções. Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical. Wagner Bettiol, 17, 2023.

SILVA, P.L.F. Compactação e seus efeitos sobre o funcionamento do solo e a absorção de nutrientes pelas plantas: Uma revisão bibliográfica. **Meio Ambiente**, 3, 24–33, 2021.

SNEDECOR, G. W., & COCHRAN, W. G. **Statistical methods** (8 ed). Iowa State University Press. 1989.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:229-235, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J. & URLANI NETO, V.L. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - Stolf. São Paulo, MIC/IAA/PNMCA-Planalsucar, 1983. 8p. (Boletim, 1)

Taylor, D. W. **Fundamentals of Soil Mechanics** (Wiley (ed.); 1st ed.). 1948.

TORMENA, C.A. & ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 20:333-339, 1996.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S. & VINHAL-FREITAS, I.C. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. **Ci. Flor.**, 21:643-655, 2011.