



**ZÉLIO RESENDE DE SOUZA**

**QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO  
VERMELHO CULTIVADO COM CAFEEIROS EM FUNÇÃO  
DO TEMPO DE MANEJO E DECLIVIDADES.**

**LAVRAS - MG  
2020**

**ZÉLIO RESENDE DE SOUZA**

**QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO  
CULTIVADO COM CAFEIEIRO EM FUNÇÃO  
DO TEMPO E DECLIVIDADES**

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.

Professor Dr. Moacir de Souza Dias Junior  
Orientador

**LAVRAS - MG  
2020**

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

Souza, Zélio Resende de.

Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho cultivado com  
cafeeiro em função do tempo de manejo e declividades / Zélio  
Resende de Souza. - 2020.

88 p. : il.

Orientador(a): Moacir de Souza Dias Junior.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.  
Bibliografia.

1. Compactação do Solo. 2. Pressões Dinâmicas. 3. Estrutura  
do Solo. I. Dias Junior, Moacir de Souza. II. Título.

**ZÉLIO RESENDE DE SOUZA**

**QUALIDADE ESTRUTURAL DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO  
COM CAFEEIRO EM FUNÇÃO DO TEMPO E DECLIVIDADES**

**STRUCTURAL QUALITY OF A RED LATOSOL UNDER COFFEE  
PLANTATION AS A FUNCTION OF TIME AND SLOPE**

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.

APROVADA em 28 de agosto de 2019.

Dr. Bruno Montoani Silva	UFLA
Dr. Ivoney Gontijo	UFES
Dr. Junior Cesar Avanzi	UFLA
Dr. Piero Iori	UFGO
Ph.D Moacir de Souza Dias Junior	UFLA

Professor Dr. Moacir de Souza Dias Junior  
Orientador

**LAVRAS - MG**

2020

## DEDICATÓRIA

Ao meu pai Domingos (*in memória*) pela simplicidade  
humildade, princípios e valores ensinados, à minha irmã  
Nelma (*in memória*) pela determinação, garra,  
companheirismo, carinho e ensinamentos deixados. À minha  
mãe Luci, pela luta, esforço, orações, sempre lutou para que  
os filhos alcançassem dias melhores. Ao Dr. Leandro  
Campos pela parceria e apoio durante o curso. Ao  
pesquisador Dr. Paulo Gontijo pela amizade, inspiração,  
apoio e parceria durante a execução dos trabalhos. Ao  
professor orientador Moacir, pelo profissionalismo,  
competência e determinação, sempre me apoiando para que  
eu mantivesse a paciência e a persistência para transpor os  
obstáculos e vencer os desafios.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pela saúde, por guiar meus passos e iluminar minha caminhada nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais pela educação, ensinamentos, humildade e valorização da vida.

À Lina Rodrigues que têm sido uma companheira grande importância nessa etapa final, pelo amor, carinho, orações e palavras de incentivo nos momentos de dificuldades.

Ao Senhor Waldemar, Dona Rita e familiares, pela amizade, carisma, e que, juntamente com sua família, abriram as portas da sua casa, acolhendo-me, oferecendo apoio e auxiliando nos momentos adversos.

Ao Gilson, Cristina, filhos e seus familiares pela amizade, companheirismo, acolhimento e liberdade em sua residência.

Aos companheiros(as) e amigos(as) Bruno Montoani Silva, Silvio de Castro, Sergio Henrique Godinho Silva, Wálbert Reis dos Santos, Leandro Campos Pinto, Devison Peixoto, Diego Tassinari, Rafael Passaglia, Samara Martins Barbosa, Joana Junqueira Carneiro, Bárbara Pereira Christófaró Silva, Paula Cristina Caruana Martins, Maria Luiza Andrade, Soraya Marx Bamberg, Anita Teixeira Fernandes, Daniele Vieira Guimarães, entre outras pessoas, pelo apoio, otimismo e incentivo nos momentos de desânimo.

Às pessoas que auxiliaram diretamente ou indiretamente na execução dos trabalhos, em especial à Dulce e Doroteo no laboratório.

Aos(as) estagiários(as) que auxiliaram na coleta das informações de campos e trabalhos no laboratório, em especial à Luana Monteiro que participou em quase todas as etapas das atividades.

À Dirce pelo auxílio dos registros do curso.

Aos amigos Ulisses Figueiredo, Éder Chaves, Adriano Morais, Reinaldo Gonçalves e Maisa que incentivaram e acreditaram na capacidade de atingir os objetivos.

Aos companheiros de moradia Regis, Rodrigo, Bruno pela convivência harmônica durante os vários anos.

Às instituições de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro em equipamentos laboratoriais bolsas institucionais.

Ao consórcio Pesquisa EMBRAPA-Café e à Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), na pessoa do Dr. Paulo Gontijo pelo apoio e parceria nas atividades de campo.

À Fazenda Pinheiros do grupo “Sete Cachoeiras Estate Coffee”, na pessoa do Renato Brito pela oportunidade, parceria e apoio, o qual foi de extrema importância para a execução das atividades de campo.

Às demais propriedades Fazenda Planalto, Grupo NKG e a Cooperativa dos Cafeicultores de Guaxupé da Unidade de Nova Resende, que contribuíram para a coleta das informações das máquinas agrícolas em atividades.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade de aprendizado.

Ao professor Doutor Moacir de Souza Dias Junior, pela confiança em mim depositada, orientação, ensinamentos, amizade, respeito, oportunidade de trabalho, companheirismo, conselhos e apoio ao longo dos vários anos de caminhada acadêmica.

Aos professores do Departamento de Ciência do Solo pelo apoio, confiança, amizade, oportunidade e ensinamentos.

Aos demais professores e funcionários que fizeram parte da caminhada acadêmica e ensinamentos.

Aos demais amigos que participaram de forma direta ou indireta da minha caminhada incentivando e apoiando para vencer as barreiras.

Agradeço imensamente a vocês pela oportunidade de tê-los como amigos e dizer que sem vocês, essa concretização seria bem mais árdua.

Agradeço imensamente a TODOS vocês!

**Muito Obrigado!**

## **EPÍGRAFE**

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,  
mas lutei para que o melhor fosse feito.  
Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus,  
não sou o que era antes”

Marthin Luther King



## RESUMO

O Brasil é conhecido pelo seu potencial produtivo nas áreas agrícolas e o setor cafeeiro ocupa lugar de destaque na balança comercial do país. Áreas de produção cafeeira em sua grande maioria são manejadas com o auxílio de máquinas e equipamentos agrícolas que reduzem os custos de produção e aumentam o rendimento operacional, contudo podem promover sérios problemas quando usadas incorretamente, podendo degradar a estrutura do solo. O conhecimento da capacidade de suporte de carga do solo para fins de manejo e a aplicação de pressões dinâmicas compatíveis, auxiliam na preservação das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e, contribuindo para a produção de alimentos no mundo. Entre os processos de degradação da estrutura do solo, a compactação tem sido apontada como o principal deles. Assim, objetivou-se nesse trabalho elaborar modelos de capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho em diferentes classes de declividade de terreno por meio dos ensaios de compressão uniaxial e avaliar o impacto do maquinário agrícola no manejo da lavoura cafeeira em diferentes idades. Também foram feitas leituras das pressões dinâmicas por meio do pressurômetro com a finalidade de conhecer as pressões dinâmicas aplicadas pelos equipamentos. Os modelos de capacidade de suporte de carga não foram estatisticamente diferentes na idade de onze e treze anos na camada superficial e a idade de quinze anos não houve diferença entre as camadas. O tempo de manejo não diferiram estatisticamente no impacto do manejo sobre a estrutura do solo e colhedora K3500 aplicou maior pressão dinâmica sobre a estrutura do solo.

**Palavras-chaves:** Compactação do Solo. Estrutura do Solo. Pressões Dinâmicas. Lavoura Cafeeira.

## ABSTRACT

Brazil is known for its productive potential in agricultural areas and the coffee sector occupies a prominent place in the country's trade balance. The vast majority of coffee production areas are managed with the help of agricultural machinery and equipment that reduce production costs and increase operating yield, however they can promote serious problems when used incorrectly, which can degrade the soil structure. The knowledge of the load bearing capacity of the soil for management purposes and the application of compatible dynamic pressures, help to preserve the physical, chemical and biological properties of the soil and, contributing to the production of food in the world. Among the soil structure degradation processes, compaction has been identified as the main one. Thus, the objective of this work was to develop load-bearing capacity models of a Red Oxisol for different slope classes of the terrain using the uniaxial compression tests and to evaluate the agricultural machinery impact on coffee crop management at different ages. Dynamic pressure readings were also taken with a pressurometer in order to know the dynamic pressures applied by the equipment. The load-bearing capacity models were not statistically different at the age of eleven and thirteen years in the superficial layer and the age of fifteen years there was no difference between the layers. The management time did not differ statistically in terms of the impacts caused by the management on the soil structure and the K3500 harvester applied greater dynamic pressure on the soil structure

**Keywords:** Soil Compaction. Soil Structure. Dynamic Pressures. Coffee Plantation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Artigo 1</b> .....	26
Figura 1 - Localização da fazenda no município de Campos Gerais e detalhes das áreas amostradas .....	31
Figura 2 - Teores de Matéria Orgânica do Solo nas diferentes idades de manejo da lavoura cafeeira .....	34
Figura 3 - Percentual de Matéria Orgânica do Solo nas diferentes posições de amostragem da lavoura cafeeira .....	36
Figura 4 - Curva de Retenção de Água (CRA) .....	42
Figura 5 - Biplot da Análise de Componentes Principais para as 245 amostras coletadas para a realização codificadas com a idade de manejo e posição de amostragem .....	43
<b>Artigo 2</b> .....	49
Figura 1 - Localização da fazenda no município de Campos Gerais e detalhes das áreas amostradas .....	53
Figura 2 - Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações mecanizadas sobre a estrutura do Latossolo Vermelho .....	56
Figura 3 - Modelos de Capacidade de Suporte de Carga nas diferentes camadas e idades de manejo da lavoura .....	61
<b>Artigo 3</b> .....	67
Figura 1 - Pressurômetro .....	71
Figura 2 - Condição de anteparo e sem o anteparo .....	72
Figura 3 - Detalhes da medição da largura do rodado dos equipamentos .....	73
Figura 4 - Transbordo K3, Pulverizador Arbus 2000 e Pulverizador 400 L .....	76

## LISTA DE TABELAS

<b>Artigo 1</b> .....	26
Tabela 1 - Resultados Médios de três repetições de Textura e Densidade de Partículas do Latossolo Vermelho cultivado com lavoura cafeeira .....	33
Tabela 2 - Porcentagem da soma de quadrados da análise de variância retida em cada fonte de variação para a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e capacidade de água disponível .....	37
Tabela 3 - Valores médios dos atributos físicos avaliados em diferentes idades de manejo, posições de amostragem e camadas .....	40
<b>Artigo 2</b> .....	49
Tabela 1 - Análises Granulométricas, densidade de partículas e de matéria orgânica do solo .....	55
Tabela 2 - Comparação dos MCSC para as diferentes declividades em cada camada e idade de manejo, de acordo com os procedimentos descritos em Snedecor e Cochran .....	58
Tabela 3 - Comparação dos MCSC entre as camadas para as diferentes idades de manejo, de acordo com os procedimentos descritos em Snedecor e Cochran ....	59
Tabela 4 - Comparação dos MCSC em cada camada para as diferentes idades de manejo, de acordo com os procedimentos descritos em Snedecor e Cochran ....	59
Tabela 5 - Porcentagem de amostras compactadas em função da idade de manejo, camada amostrada, declividade e posição de amostragem .....	62
<b>Artigo 3</b> .....	67
Tabela 1 - Colhedoras de café usadas na coleta de dados na mesma classe de solo .....	73
Tabela 2 - Tratores e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira .....	74
Tabela 3 - Comparação das pressões dinâmicas aplicadas entre as condições com tábua e sem tábua, com leitura em kPa .....	77
Tabela 4 - Pressões dinâmicas aplicadas em kPa pelas colhedoras e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira na condição com anteparo .....	78
Tabela 5 - Pressões dinâmicas aplicadas em kPa pelas colhedoras e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira na condição sem anteparo .....	81

## LISTA DE SIGLAS

CAD	Capacidade de Água Disponível
CP	Componentes Principais
CRA	Curva de Retenção de Água
Dp	Densidade de partículas
Ds	Densidade do solo
EL	Entrelinha
H	Homogêneo
M11	Manejo com 11 anos de idade
M13	Manejo com 13 anos de idade
M15	Manejo com 15 anos de idade
Micro	Macroporosidade
MCSC	Modelos de capacidade de Suporte de Carga
Macro	Microporosidade
NH	Não homogêneo
ns	não significativo
Pt	Porosidade total
RB	Rodado de Baixo
RC	Rodado de Cima

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	13
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1	<b>Compactação do solo</b> .....	15
2.2	<b>Compactação em lavouras cafeeiras</b> .....	17
2.3	<b>Pressões dinâmicas</b> .....	20
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	22
	<b>SEGUNDA PARTE - Artigos</b>	
	<b>ARTIGO 1 - EFEITO DO MAQUINÁRIO AGRÍCOLA NAS PROPRIEDADES DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM LAVOURA CAFEIEIRA</b> .....	26
	<b>RESUMO</b> .....	26
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	28
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
3.1	<b>Matéria orgânica do solo</b> .....	33
3.2	<b>Atributos físicos</b> .....	37
3.3	<b>Curva de retenção de água</b> .....	42
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	44
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	45
	<b>ARTIGO 2 - EFEITO CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CAFEIROS E IMPACTO DO MANEJO EM FUNÇÃO DE IDADE, CAMADA, DECLIVIDADE E POSIÇÃO DE AMOSTRAGEM</b> .....	49
	<b>RESUMO</b> .....	49
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	51
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	53
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	57
3.1	<b>Modelos de capacidade de suporte de carga</b> .....	57
3.2	<b>Avaliação do impacto dos rodados</b> .....	61
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	63
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	64
	<b>ARTIGO 3 - Pressões dinâmicas dos equipamentos de manejo na lavoura cafeeira através do pressurômetro</b> .....	67
	<b>RESUMO</b> .....	67
1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	69
2	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	71
3	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	76
4	<b>CONCLUSÕES</b> .....	84
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	85
	<b>APÊNDICES</b> .....	86

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

O café é uma commodity agrícola importante para o país, sendo cultivado em torno de 11 milhões de hectares em mais de 50 países, com produção anual de 155 milhões de sacas (60 kg) o que representa 9,2 milhões de toneladas (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2019a). Mundialmente, o mercado de café movimentou em 2016, 20 bilhões de dólares apenas de café verde, atingindo 37 bilhões de dólares incluindo café moído e extrato (solúvel) (FAO, 2019b).

A cafeicultura no Brasil se expande em boa parte do território nacional, com área expressiva na região sudeste. Segundo o ministério da agricultura, o Brasil é o segundo maior consumidor e o maior produtor e exportador de café do mundo. O café está em quinto lugar na lista de exportações do agronegócio brasileiro, sendo comercializado 30,9 milhões de sacas em 2017, com uma movimentação de US\$ 5,24 bilhões de dólares em 2017 e US\$ 35 bilhões no período de 2012 a 2017 (CONAB, 2017). Em 2018, a produção em sacas foi de 14 milhões de café da espécie conilon e 46 milhões do arábica, totalizando 60 milhões de sacas, em uma área de 1,86 milhão de hectares somando todas as regiões produtoras do país e empregando 8 milhões de pessoas, segundo os dados da CONAB, 2018.

O manejo correto do solo na agricultura é importante para a preservação da sua qualidade estrutural, a fim de preservar suas propriedades físicas e a capacidade de expressar seu potencial agrícola ao longo dos anos subsequentes de cultivo. Em áreas com intenso uso de máquinas e equipamentos agrícolas, é preciso atentar às peculiaridades intrínsecas das classes de solo, uma vez que na maioria das propriedades agrícolas o solo é explorado de maneira incorreta comprometendo sua qualidade física.

Na cafeicultura mais tecnificada o emprego de máquinas é constante, executando praticamente todas as etapas de manejo da lavoura, desde a implantação da lavoura, prosseguindo pelos tratos culturais e colheita, até o escoamento da produção da propriedade rural. Mesmo em propriedades menores, com pouco nível tecnológico, pode haver maquinário empregado durante algumas etapas de manejo, podendo também nestes casos alterar as qualidades estruturais do solo.

O manejo dessas lavouras cafeeiras empregando máquinas e equipamentos agrícolas poderá promover a degradação da estrutura do solo ao longo dos anos quando executadas de maneira inadequada, em relação à capacidade de carga que o solo é capaz de suportar. Segundo a organização das nações unidas (FAO, 2015), 33% dos solos agrícolas do mundo estão com algum processo de degradação (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994). Diante disso é possível entender que as ações antrópicas vêm comprometendo a capacidade produtiva desses solos, gerando uma enorme preocupação com os atuais manejos adotados.

Entre os processos de degradação da estrutura do solo, a compactação é a principal delas (DIAS JUNIOR et al., 2007). A compactação abrange todas as áreas produtivas, sendo um problema global na produção agrícola (SOANE; VAN OUWERKERK, 1994) devido estar diretamente relacionada aos fatores internos e externos (DIAS JUNIOR, 2000; HORN, 1995; LEBERT; HORN, 1991; RAGHAVAN; ALVO; MCKYES, 1990). Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência de carga aplicada, enquanto os fatores internos são influenciados pela história de tensão, umidade, textura, estrutura, densidade inicial do solo, mineralogia e teor de carbono (AJAYI, 2009; DIAS JUNIOR, 1994; ETANA; COMIA; HAKANSSON, 1997; GUPTA; HADAS; SCHAFER, 1989; LEBERT; HORN, 1991).

Avaliando a compactação do solo pelo maquinário agrícola em lavouras cafeeiras, Martins et al. (2012) encontraram diferentes percentuais de amostras compactadas quando compararam os rodados de baixo e de cima em diferentes declividades de terreno. Já nos resultados encontrados por Iori et al. (2014a), a declividade entre o rodado de cima e o rodado de baixo influenciou na microporosidade e na estabilidade de agregados, indicando efeito significativo do local de amostragem na qualidade física do solo em lavouras cafeeiras.

O efeito da compactação pode ser persistente no subsolo afetando diretamente seus processos, por exemplo, retenção de água, condutividade hidráulica saturada e não saturada, conteúdo do ar e trocas gasosas, crescimento das raízes e o transporte e absorção de nutrientes (MÜLLER et al., 2014), além da redução do desenvolvimento do sistema radicular, afetando a eficiência na utilização dos nutrientes pelas plantas, resultando no decréscimo da produtividade (BOTTA et al., 2002; BEUTLER et al., 2007), sendo esses efeitos bem visíveis em áreas de produção das culturas (BOUMA, 2012).



Diante disso, objetivou-se desenvolver modelos de capacidade de suporte de carga do solo e inferir sobre o manejo empregado em lavoura cafeeira, sob o sistema de irrigação localizada, com o intuito de avaliar o impacto das máquinas e equipamentos empregados nas atividades através da pressão de pré-consolidação obtida no ensaio de compressão uniaxial, considerando a inclinação do terreno, a profundidade da camada amostrada e o tempo de manejo da lavoura. Também foram determinadas as pressões dinâmicas de algumas máquinas e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira por meio do pressurômetro.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Compactação do Solo**

A compactação do solo é um problema que ocorre na maioria das fazendas com alguma atividade agrícola produtiva, sendo um problema de difícil solução. A compactação do solo está relacionada principalmente ao manejo inadequado do solo, no qual se destaca a aplicação de altas pressões sobre a superfície do solo que ultrapassam a capacidade de suporte de carga do solo.

Um dos desafios é o emprego destas máquinas e equipamentos agrícolas de maneira a preservar o arranjo estrutural do solo, evitando assim a degradação da sua estrutura causada pela compactação do solo. Essas máquinas, por sua vez, estão cada vez mais robustas que proporcionam melhor rendimento operacional, por outro lado não levam em consideração a capacidade de suporte de carga do solo, o que pode ser considerado um agravante na queda da produtividade.

Na área da engenharia civil a compactação é desejável que ocorra até o maior grau possível a fim de evitar o recalque da obra construída. Em ciências agrárias, esta pode ser entendida como sendo indesejável, pois, é causada pelo manejo inadequado do solo (HILLEL, 1998). Assim, a compactação é a alteração estrutural do solo devido à aplicação de uma pressão superior àquela que o solo suporta, reduzindo a macroporosidade, alterando o tamanho e a continuidade de poros e aumentando a densidade do solo. Também ocorre aumento da resistência do solo à penetração, reduzindo a infiltração e a redistribuição de água, redução de trocas gasosas e disponibilidade de nutrientes (VALADÃO et al., 2015; SCAPINELLI et al., 2016), culminando na intensificação do processo erosivo.

A compactação do solo pode ocorrer em camadas inferiores do perfil do solo, agravando ainda mais a degradação da estrutura em locais mais profundos, o que dificulta o crescimento do sistema radicular das culturas. A pressão sofrida pela estrutura na superfície do solo pode ser transferida para camadas inferiores, alterando o arranjo estrutural e tornando o solo compactado ao longo do perfil do solo.

Nos perfis do solo com compactação nas camadas subsuperficiais, há uma maior dificuldade no desenvolvimento do sistema radicular devido a redução do espaço poroso para crescimento das raízes. Neste contexto, a movimentação da solução do solo também pode ser afetada, tornando mais difícil que esta solução se desloque até o sistema radicular das plantas, reduzindo a absorção dos nutrientes do solo (AN JING et al., 2015), comprometendo o desenvolvimento da planta e, por consequência, resultando em queda na produção. A compactação reduz a porosidade e infiltração de água no perfil do solo, aumento da densidade do solo e os processos erosivos são intensificados (MOREIRA et al., 2014; TORRES et al., 2014).

A declividade do terreno também deve ser considerada quando se trata do manejo mecanizado. Em áreas declivosas, o centro de gravidade de massa do maquinário empregado tende a ficar mais próximo do rodado de baixo, fazendo com que esse eixo da máquina transmita maior pressão ao solo em comparação com o rodado de cima da máquina. Dessa maneira, o solo do local do rodado de baixo pode sofrer maior compactação e apresentar maior degradação estrutural.

Outro fator que pode agravar a compactação é a intensidade do tráfego de máquinas com sucessivas passadas destas máquinas no mesmo local, podendo promover consequências mais severas, tornando a estrutura mais degradada. Em determinadas culturas é inevitável que isso ocorra, entretanto com o uso de ferramentas de georreferenciamento, é possível monitorar o local de tráfego do maquinário, de maneira que não venha sobrepor o local de tráfego anterior. Em áreas cultivadas com lavoura cafeeira, em que é necessário trafegar com o trator várias vezes no ano e sempre na mesma linha de tráfego, tal fato se torna impossível devido ser uma cultura perene e pela arquitetura fisiológica da planta.

Além desses fatores envolvidos, o tráfego destes maquinários e seus respectivos implementos na área não levam em consideração a faixa de umidade ideal do solo para o tráfego destas máquinas, ocorrendo em muitas situações, o tráfego de máquinas em umidades do solo alta, onde o mesmo apresenta baixa capacidade de suporte de carga. A maioria das atividades de manejo empregadas são realizadas de

acordo com a necessidade da cultura, independente da época do ano e da umidade do solo.

## **2.2 Compactação em Lavouras Cafeeiras**

Na busca por uma cafeicultura cada vez mais sustentável, tanto do ponto de vista econômico como ambiental, torna-se indispensável o uso de ferramentas e tecnologias que avaliem a qualidade do solo. Desse modo, o monitoramento da compactação do solo em áreas ocupadas com cafeicultura é de suma importância na compreensão e caracterização do solo, tornando-se assim, uma ferramenta indispensável na preservação e conservação dos solos nestas áreas.

Em lavouras cafeeiras manejadas com máquinas e implementos agrícolas há uma maior possibilidade de compactação do solo devido às intensas atividades rotineiras demandadas pela cultura. Ressalta-se que muitas dessas atividades são executadas no período chuvoso, sendo a época de maior suscetibilidade do solo à compactação.

O manejo adequado do solo é de grande importância para a manutenção da conservação do solo promovendo uma boa estruturação do mesmo, melhorando a percolação de água no solo e conseqüentemente sua capacidade produtiva. Portanto, o desenvolvimento da cafeicultura depende e dependerá cada vez mais de utilização de máquinas, o que pode aumentar significativamente o potencial de compactação dos solos destas regiões, caso não seja feito nenhum tipo de monitoramento e emprego de manejo adequado do solo.

Avaliando um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros na região do Alto Paranaíba, Silva et al. (2006) determinaram, por meio de modelos de capacidade de suporte de carga, a influência das operações de manejo na estrutura desta classe de solo, em três camadas nas estações seca e chuvosa. Os autores concluíram que ocorreu redução das pressões de pré-consolidação na estação chuvosa em relação à estação seca, indicando que a capacidade de suporte de carga diminui com o aumento da umidade do solo.

Dentre as operações que utilizam maquinário na cafeicultura, temos o manejo de plantas invasoras, sem o qual a produtividade dos cafeeiros é muito afetada. No entanto, tal manejo em lavouras cafeeiras pode alterar os atributos químicos, físico-hídricos e biológicos do solo, modificando o comportamento compressivo e,

consequentemente, a capacidade de suporte de carga do solo (ARAUJO-JUNIOR et al. 2008). Neste sentido, vários trabalhos foram desenvolvidos visando avaliar a influência dos diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras sobre a resistência à compactação dos solos em lavouras cafeeiras.

Avaliando a influência dos diferentes sistemas de manejo de plantas invasoras sobre a resistência à compactação em três camadas de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), empregando modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC), Araujo-Junior et al. (2008) verificaram que a camada de 25 - 28 cm foi a que se mostrou mais suscetível à compactação no sistema de manejo utilizando herbicida de pré-emergência, e os sistemas de manejo “sem capina”, herbicida de pós-emergência nas camadas de 0 - 3, 10 - 13 e 25 - 28 cm, capina manual nas camadas de 0 - 3 e 25 - 28 cm e herbicida de pré-emergência na camada de 10 - 13 cm apresentaram a mesma resistência à compactação. Santos et al. (2010) avaliaram, nesta mesma área de estudo, nas linhas de tráfego e entrelinhas do tráfego de maquinários, a susceptibilidade à compactação da enxada rotativa, grade de disco e roçadora. Os resultados deste estudo mostraram que nas entrelinhas de tráfego a enxada rotativa e a roçadora promoveram compactação do solo e a grade de discos proporcionou um alívio da resistência mecânica do solo. Já na linha de tráfego de máquinas a enxada rotativa foi o método de controle de plantas invasoras mais suscetível à compactação na camada superficial do solo, sendo que na camada de solo de 10 a 13 cm a enxada rotativa, a grade de discos e a roçadora promoveram compactação do solo. No entanto, na camada de 25 a 28 cm de solo uma maior susceptibilidade a compactação foi promovida pela roçadora.

Também avaliando diferentes manejos de plantas invasoras para um Latossolo Vermelho distroférico no município de São Sebastião do Paraíso, Araújo-Junior et al. (2011) verificaram que os diferentes manejos de plantas invasoras utilizados no centro das entrelinhas da lavoura cafeeira não influenciaram no teor de carbono orgânico e na densidade do solo, a qual reflete a compactação do solo, na camada de 25-28 cm, em relação ao solo sob mata nativa. Pais et al. (2011) verificaram que os manejos de plantas de cobertura na entrelinha do cafeeiro que promoveram menor compactação do solo foram braquiária, crotalária e soja. Pais et al. (2013) avaliando a capacidade de suporte de carga de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a cinco manejos de plantas invasoras sendo três, por meio do controle mecânico (grade de discos, roçadora e trincha), e dois, por meio do controle químico (herbicida de pós-emergência e herbicida de pré-emergência). Os autores observaram neste estudo que os modelos de capacidade

de suporte de carga indicaram maior suscetibilidade à compactação na camada de 0 - 3 cm para o uso de herbicida de pós-emergência; na camada 10 - 13 cm para o uso de grade de discos e trincha e; na camada de 25 - 28 cm para o uso de herbicida de pré-emergência. A avaliação do manejo empregado a partir desses modelos de capacidade de suporte de carga, identificaram maior compactação do solo na camada de 0 - 3 cm quando utilizou-se a trincha e grade de discos; na camada 10 - 13 cm para o uso de herbicida de pré-emergência, herbicida de pós-emergência e roçadora e; na camada de 25 - 28 cm quando utilizou-se grade de discos.

Avaliando os efeitos dos métodos culturais, mecânicos e químicos de controle de plantas daninhas na cultura cafeeira, Pires et al. (2017a, 2017b) observaram que nas duas camadas de solo estudadas (0 - 3 cm e 10 - 13 cm), a cultura do cafeeiro submetida a métodos culturais, mecânicos e químicos de controle de plantas daninhas, aumentou a retenção de água e os parâmetros de disponibilidade de água, quando comparada ao solo da floresta nativa, como consequência da alteração na distribuição do tamanho dos poros. No entanto, a manutenção de plantas de cobertura nas entrelinhas da cultura do café foi o único método de controle de plantas daninhas que melhorou o armazenamento de água e não causou danos ao espaço poroso do solo. Os autores ainda observaram que, para os métodos mecânicos de controle de ervas daninhas, a capina manual de enxada aumentou a água disponível para as plantas, enquanto a roçadora mecânica diminuiu, devido à possível compactação do solo induzida pelo tráfego excessivo de maquinário. Na avaliação dos métodos químicos de controle de plantas daninhas, os autores observaram que o uso de herbicidas pré-emergentes danificou mais a estrutura do solo do que os herbicidas pós-emergentes, provavelmente devido à formação de crostas no solo.

Outros fatores como o tempo de cultivo e a inclinação do relevo na área cultivada podem influenciar na degradação estrutural dos solos cultivados com café. Neste sentido, Iori et al. (2014a) analisaram, em plantações de café com diferentes idades de cultivo e com diferentes declividades na entrelinha, o efeito do tráfego de máquinas sobre as propriedades físicas em um Latossolo Vermelho-Amarelo no município de Três Pontas-MG. Os autores verificaram que as amostras entre as linhas de tráfego foram as que apresentaram os melhores resultados em termos de preservação da estrutura do solo, em relação às amostras das linhas de tráfegos (de baixo e de cima), e que as amostras da linha de tráfego de cima evidenciaram piores resultados em termos de degradação da estrutura do solo do que a linha de tráfego de baixo, sendo um

resultado contrário ao esperado. Os autores também observaram que a idade de cultivo da cultura foi o principal fator que interferiu na degradação estrutural dos solos na cultura do cafeeiro. Iori et al. (2014b) avaliando o comportamento da pressão de pré-consolidação, no decorrer de um ano para esta mesma área de estudo também observaram que, ao longo de um ano agrícola, o tempo de cultivo e a declividade do terreno tiveram um efeito significativo sobre a alteração estrutural do solo, sendo que as áreas com maior idade de cultivo e as mais declivosas apresentaram os maiores valores de pressão de pré-consolidação.

Avaliando as alterações de alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiro, após quatro anos da implantação, no Sul de Minas Gerais, sob três sistemas de manejo, em comparação à mata nativa, Carmo et al. (2011) verificaram que o sistema de produção de café com mecanização aumentou a densidade do solo e resistência do solo à penetração e reduziu o volume total de poros, da macroporosidade e da relação macro/microporosidade. Nesse mesmo sentido, avaliando a suscetibilidade do solo à compactação em função da idade de manejo, Martins et al. (2012) concluíram que a camada de 0 a 3 cm apresentou maior compactação ao comparar com a camada de 15 a 18 cm em lavouras cafeeiras com 2, 7, 18 e 33 anos de idade de manejo.

Estes estudos são de fundamental importância no contexto do manejo ambiental sustentável dentro da cafeicultura nacional, através dos modelos de capacidade de suporte de carga, estratégias de manejo conforme a umidade do solo, onde esses resultados podem ser aplicados em diversas regiões produtoras de café, proporcionando melhoria ou manutenção da estrutura do solo, de forma a evitar sua compactação pelo manejo inadequado dentro do setor cafeeiro.

### **2.3 Pressões Dinâmicas**

As pressões dinâmicas aplicadas pelas máquinas agrícolas durante suas atividades agrícolas estão relacionadas com uma série de fatores. Assim, as características das máquinas influenciam na aplicação das pressões dinâmicas (SCHJØNNING et al., 2015; ALAOUI e DISERENS, 2018) e o seu uso deve ser planejado de acordo com as limitações do solo, evitando o tráfego em solos úmidos (DIAS JUNIOR et al., 2008). No entanto, há uma carência de informação acerca das

pressões dinâmicas aplicadas pelos equipamentos agrícolas durante a execução de suas atividades a campo.

A pressão exercida pela máquina sobre o solo varia em função do peso da máquina, tipo de rodado, pressão de inflação e tipo dos pneus e força de tração dos equipamentos, ou seja, é dependente da área de contato do pneu com o solo durante o deslocamento (VISCHI FILHO et al., 2015; SILVA et al., 2016). Durante o tráfego da máquina nas operações de manejo, estas podem aplicar ao solo, pressões dinâmicas diferentes das pressões estáticas e promover alterações físicas na estrutura do solo. Araujo-Júnior et al. (2009) avaliando a pressões dinâmicas de algumas máquinas empregadas no manejo de áreas florestais, concluíram que as pressões aplicadas por estas máquinas excederam aos valores encontrados nos manuais dos fabricantes em até dez vezes, indicando a necessidade de aprimorar os estudos de outros equipamentos agrícolas com potencial de compactação do solo.

Pela importância das áreas cultivadas com cafeicultura, estes tipos de estudos corroboram com a necessidade de um monitoramento da compactação do solo mais detalhado, independente do manejo adotado para a cultura do café. Também relatam a importância de aprimorar os estudos para melhor avaliação das pressões dinâmicas aplicadas pelas máquinas no manejo das suas funções diárias.

## REFERÊNCIAS

- AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; ALADENOLA, O. O.; SOUZA, T. T. T.; INDA JUNIOR, A. V. Comparison of estimation methods of soil strength in five soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 33, n. 3, p. 487-495, 2009.
- ALAOUI, A.; DISERENS, E. Mapping soil compaction – a review. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, v. 5, p. 60-66, 2018.
- AN, J., ZHANG, Y., YU, N. Quantifying the effect of soil physical properties on the compressive characteristics of two arable soils using uniaxial compression tests. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 145, p. 216-223, 2015.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.09.002>
- ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. de S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 35, p. 115-131, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000100011.
- ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PIRES, B. S. Resistência à compactação de um Latossolo cultivado com cafeeiro, sob diferentes sistemas de manejo de Plantas invasoras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 32, p. 23-32, 2008.
- ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. de S.; LEITE, F. P.; GAUDERETO, G. S. Determination of applied pressure on the soil by forest machines using a simple equipment for measurements. In: *Escuela Latinoamericana de Física de Suelos*, X., 2009, Lavras. **Anales...** Lavras: Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2009, p. 116-120.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ALVARO, P. SILVA. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP; v. 27, n. 1, p. 146-151, jan./abr. 2007.
- BOTTA, G. F., JORAJURIA, D.; M. DRAGHI, L. M. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. **Journal of Terramechanics**. v. 39, n. 1, p. 47-54, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(02\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(02)00003-4)
- BOUMA, J. Soil compaction: Societal concerns and upcoming regulations. **Nordic Association of Agricultural Scientists**, Uppsala, SWE; v. 8, n. 1, p. 11-12, 2012.
- CARMO, D. do L.; NANNETTI, D. C.; DIAS JUNIOR, M. de S.; SANTO, D. J. do E.; NANNETTI, A. N.; LACERDA, T. M. Propriedades físicas de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com cafeeiro em três sistemas de manejo no sul de minas gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 35, n. 3, p. 991-998, Jun, 2011.



Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, v. 4, n. 4, Quarto levantamento, p. 1-84, Brasília, DF, dezembro 2017.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, v. 5, n. 4, Quarto levantamento, p. 1-84, Brasília, DF, dezembro 2018.

DIAS JUNIOR, M. S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. V.; SHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: UFV, 2000. p. 55-94.  
DIAS JUNIOR, M. S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. East Lansing, Michigan State University, 1994. 114p. (Tese de Doutorado).

DIAS JUNIOR, M. S.; FONSECA, S.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; SILVA, A. R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF; v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, S. R.; SANTOS, N. S.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Assessment of the soil compaction of two Ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 32, p. 2245-2253, 2008.

ETANA, A.; COMIA, R. A.; HAKANSSON, I. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, n. 1, p. 13-21, 1997.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT: Production**. Rome: FAO Statistics Division, 2019a. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> >. Acesso em: 15 mar. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT: Crops and livestock products**. Rome: FAO Statistics Division, 2019b. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Status of the World's Soil Resources, Rome, Italy, 2015.

GUPTA, S. C.; HADAS, a.; SCHAFER, R. L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W. E.; BLAKE, G. R.; ALLMARAS, R. R. VOORHEES, W. B.; GUPTA, S. C. eds. **Mechanics and related process in structured agricultural soils**. The Netherlands, Kluwer academic Publishers, p. 137-152, 1989.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego, Academic Press, 1998.

HORN, R.; DONMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.

- IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; ABREU JÚNIOR, A. A. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG; v. 38, n. 1, p. 107-117, 2014a.
- IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; SOUZA, Z. R.; FIGUEIREDO, V. C. Seasonal change of soil precompression stress in coffee plantation under sub-humid tropical condition. **Coffee Science**. Lavras, MG; v. 9, p. 145-54, 2014b.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL; v. 19, p. 274-286, 1991.  
[http://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90095-F](http://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90095-F)
- MARTINS P. C. C, DIAS JUNIOR, M. S.; ANDRADE, M. L. C.; GUIMARÃES, P. T. G. Compaction caused by mechanized operations in a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee over time. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, MG; v. 36, p. 391-398, 2012.
- MARTINS P. C. C, DIAS JUNIOR, M. S.; ANDRADE, M. L. C.; GUIMARÃES, P. T. G. Compaction caused by mechanized operations in a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee over time. **Ciência e Agrotecnologia**, MG; v. 36, p. 391-398, 2012.
- MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; BETIOLI JUNIOR, E.; PETEAN, L. P.; ALVES, S. J. Influência da altura de pastejo de azevém e aveia, em atributos físicos de um Latossolo vermelho distroférrico, após sete anos sob integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 38, n. 4, p. 1315-1326, 2014.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400027>.
- MÜLLER, R.; FEIDEN, A.; VILLI GERKE, L.; GABRIEL MARI, A.; LUCIO, L. T. Atributos associados ao grau de compactação do solo e sua correlação com a produção agrícola. **Acta Iguazu**, Cascavel, PR; n. 3, p. 46-56, 2014.
- PAIS, P. S. M.; DIAS JUNIOR, M. de S.; SANTOS, G. A. dos; DIAS, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. de. Compactação causada pelo manejo de plantas invasoras em Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 35, p. 1949-1957, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000600011.
- PAIS, P. S. M.; DIAS JUNIOR, 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. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, MG; v. 37, p. 145-151, 2013.
- PIRES, L. F.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; AULER, A. C.; DIAS, N. M. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; ALCÂNTARA, E. N. Soil physico-hydrical properties changes induced by weed control methods in coffee plantation. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, NL, 246, 261-268, 2017a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.008>

- PIRES, L. F.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS, N. M. P.; DIAS JUNIOR, M. S.; ALCÂNTARA, E. N. Weed control methods effect on the hydraulic attributes of a Latosol. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR; v. 39, p. 119-128, 2017b.
- RAGHAVAN, G. S. V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: A review toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, UK, v. 11, p. 1-36, 1990.
- SANTOS, G. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; PAIS, P. S. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes métodos de controle de plantas invasoras na cultura cafeeira. **Coffee Science**, Lavras, MG; v. 5, p. 123-136, 2010.
- SCAPPINELLI, A.; DEINA, F. R.; VALADÃO JUNIOR, D. D.; VALADÃO, F. C. A.; PEREIRA, L. B. Sistema radicular e componentes produtivos do girassol em solo compactado. **Bragantia**. Campinas, SP; v. 75, n. 4, out./dez, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.286>.
- SCHJØNNING, P.; STETTLER, M.; KELLER, T.; LASSEN, P.; LAMANDÉ, M. Predicted tyresoil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL; v. 152, p. 52-66, 2015.
- SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. D.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um Latossolo Amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG. v. 30, p. 207-216, 2006.
- SILVA, R. B. D.; IORI, P.; SOUZA, Z. M. D.; PEREIRA, D. D. M. G.; VISCHI FILHO, O. J.; SILVA, F. A. D. M. Contact pressures and the impact of farm equipment on Latosol with the presence and absence of sugarcane straw. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG; v. 40, p. 265-278, 2016.
- SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. Conclusions and recommendations fo Further Research on Soil compaction in Crop Production. **Developments in Agricultural Engineering**, ISSN: 0167-4137, V. 11, Issue: C, Page: 627-642, 1994. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50034-9>.
- TORRES, L. C.; BARROS, K. R. M.; LIMA, H. V. Alterações na qualidade física de um Latossolo amarelo sob pastagem. **Acta Amazonica**, Manaus, AM; v. 44, n. 4, p. 419-426, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672014000400003>.
- VALADÃO, F. C. ASSIS.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; BIANCHINI, A. adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 39, p. 243-255, 2015.
- VISCHI FILHO, O. J.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF; v. 50, 322-332, 2015.

## SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

### Artigo 1

#### EFEITO DO MAQUINÁRIO AGRÍCOLA NAS PROPRIEDADES DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM LAVOURA CAFEIEIRA

#### MACHINERY EFFECTOS ON THE PROPERTIES OF A RED LATOSOL UNDER COFFEE PLANTATION

#### RESUMO

O adequado manejo do solo agrícola está relacionado com a preservação de sua estrutura, onde suas propriedades são mantidas para que o mesmo possa exercer suas funções ao longo dos anos de cultivo. O uso de máquinas no manejo das lavouras cafeeiras pode promover degradação da sua estrutura, interferindo no sistema poroso e nas demais funções relacionadas. Dessa forma, as propriedades do solo são usadas para avaliar sua qualidade física, que expressam valores diferentes quando comparadas com outras condições sem interferência de manejo. Com o objetivo de avaliar o impacto do maquinário no manejo da lavoura cafeeira, foram elaboradas as curvas de retenção de água e avaliados os teores de matéria orgânica, densidade do solo e o sistema poroso em lavouras cafeeiras após onze, treze e quinze anos de manejo, nas classes de declividades de 0 a 3%, de 3 a 8% e de 8 a 16%. Estas propriedades foram avaliadas nas camadas de 0 a 3 cm, de 10 a 13 cm e de 25 a 28 cm de profundidade, nas condições do rodado da máquina, sendo definidos como rodado de cima e rodado de baixo e, nas entrelinhas da lavoura cafeeira. Os teores de matéria orgânica foram maiores na entrelinha em relação aos rodados de baixo e de cima e a idade com manejo de 15 anos apresentou menor capacidade de água disponível.

**Palavras-chave:** Densidade do solo. Lavoura cafeeira. Declividade de terreno.

## ABSTRACT

Proper management practices are related to the preservation of soil structure, maintaining its properties so that the soil can perform its functions throughout the years. The use of farm machinery on the management of coffee plantations may lead to soil structure degradation, affecting the porous system and related functions. Thus, soil properties are used to assess its physical quality, expressing different values when compared to other conditions unaffected by management practices. Aiming to evaluate the impact of farm machinery on a coffee plantation, we determined the soil water retention curve, organic matter contents, bulk density and total porosity in coffee plantations with eleven, thirteen and fifteen years under management, in different slope conditions: 0 to 3%, 3 to 8% and 8 to 16%. These properties were evaluated in the soil layers defined by the depths of 0 to 3 cm, 10 to 13 cm and 25 to 28 cm. The samples were taken from the traffic lines (upper and lower traffic line) and also on the center of the interrow. Organic matter content was higher on the interrow in comparison to the upper and lower traffic lines and the soil with fifteen years of management presented higher available water.

**Keywords:** Bulk density. Coffee plantation. Slope.

## 1 INTRODUÇÃO

As propriedades físicas do solo interferem na sua capacidade de exercer funções, como aeração do solo, trocas gasosas, crescimento de raízes dentre outras funções ao longo dos anos de cultivo e no desenvolvimento das plantas, refletindo diretamente na produção das culturas. Segundo Oliveira et al. (2014), algumas práticas de manejo podem promover a degradação da estrutura dos solos agrícolas a médio e longo prazo. Assim, o emprego de máquinas e equipamentos numa determinada área agrícola sem critérios de planejamento, podem afetar suas propriedades, contribuindo para a degradação da sua estrutura, resultando em queda da produtividade da cultura ao longo dos anos de cultivo.

Alterações estruturais promovidas pelo manejo refletem diretamente na densidade do solo e na sua porosidade (OLIVEIRA et al., 2015). Essas alterações estruturais podem resultar em compactação do solo que tendem a aumentar a resistência do solo à penetração de raízes (STEFANOSKI et al., 2013), comprometendo o desenvolvimento das plantas e sua produtividade.

Entre os atributos do solo, a porosidade é responsável pelas trocas gasosas, fluxo de nutrientes, condutividade hidráulica da água e desenvolvimento do sistema radicular das culturas. Segundo Blum et al. (2014) uma boa qualidade física do solo está atribuída à porosidade total e macroporosidade maiores e, com menor densidade do solo em algumas classes de solo e boa capacidade de disponibilidade de água para o sistema radicular das culturas. A avaliação da porosidade do solo, sendo os macroporos e microporos, assim como a densidade do solo, são análises mais baratas e rápidas quando comparadas com metodologias de avaliação para outros atributos do solo (SALES et al., 2016), podendo indicar a qualidade física do solo. Na realização de atividades como adubação, controle de plantas daninhas, pulverizações para o controle de pragas e doenças entre outras, são utilizados tratores agrícolas que trafegam sobre o solo podendo causar compactação do solo, afetando diretamente a macroporosidade de solo. Assim, o tráfego dessas máquinas tem provocado alterações significativas nesses atributos, principalmente na macroporosidade, dando origem a compactação do solo (CORTEZ et al., 2014).

Em lavouras cafeeiras mecanizadas, o emprego destes equipamentos é constante, aumentando a intensidade de tráfego nestas áreas, e aplicando uma pressão à superfície do solo nos mesmos locais, devido ser uma cultura perene e o tráfego ocorrer

sempre na mesma entrelinha da lavoura cafeeira. Esses fatores podem acentuar a degradação da estrutura promovendo compactação do solo e contribuindo negativamente para a produtividade da lavoura cafeeira.

A capacidade do solo em armazenar água, redistribuir para o sistema radicular das plantas e realizar as trocas gasosas estão atrelados à porosidade do solo, variando em função do seu arranjo estrutural (KOESTEL et al., 2018) e dos sistemas de manejo (REYNOLDS et al., 2002; OLIBONE et al., 2010; JEMAI et al., 2013; SILVA et al., 2014). Essa capacidade está associada às características do solo como a mineralogia e textura (CURI et al., 1993) e as práticas de manejo empregadas na condução da lavoura (SILVA et al., 2014) que interferem na disponibilidade de água (SILVA et al., 2015b). Assim, manejos conservacionistas como o sistema de plantio e cultivo mínimo que possuem como característica a manutenção dos atributos físicos do solo, tornam-se indispensáveis (NAGAHAMA et al., 2016) para a preservação da estrutura do solo.

A quantidade de água disponível no solo depende da qualidade estrutural deste, o qual pode sofrer influência negativa resultante do manejo inadequado e do sistema radicular da cultura. Nas lavouras cafeeiras, a quantidade de água demandada pela planta varia em função do estágio fenológico da planta, juntamente com as oscilações térmicas do dia nas estações do ano e da área explorada pelo sistema radicular da planta de café. Segundo Silva et al. (2015a), as maiores quantidades de água disponível para a planta de café estão em camadas mais profundas do perfil do solo sendo aproveitadas somente quando o sistema radicular explora essas regiões. Estudos em regiões do cerrado mineiro, cultivado com cafeeiro e com sistema radicular mais alongado (CARDUCCI et al., 2014; SILVA et al., 2016), mostraram que déficit hídrico até a camada de 0,2 metro de profundidade não afeta a produtividade da área (SILVA et al., 2015a) pois o sistema radicular aprofundado consegue absorver água e nutrientes das camadas abaixo desta.

A região Sul do estado de Minas Gerais, possui uma vasta extensão territorial de relevo inclinado sendo cultivado com lavouras cafeeiras e manejadas com máquinas agrícolas. Nessas áreas, o rodado de baixo da lavoura tende a receber maior pressão aplicado pelo equipamento em relação ao rodado de cima e à entrelinha, podendo resultar em maior degradação estrutural nesses locais (IORI et al., 2014b). Segundo Gontijo et al. (2008), Martins et al. (2012) e Iori et al. (2014a), foram encontrados maiores valores de macroporosidade e porosidade total na entrelinha e maior deformação da estrutura na linha do rodado dos equipamentos. Diante disso, algumas

lavouras vêm apresentando queda de produtividade da cultura mesmo em solos com boas características nos aspectos de fertilidade.

Mediante a importância da cultura do cafeeiro para o cenário agrícola do país, objetivou-se avaliar os atributos físicos como a densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, capacidade de água disponível, curva de retenção de água e o teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros, a fim de quantificar o impacto do manejo empregado sobre a estrutura do solo.

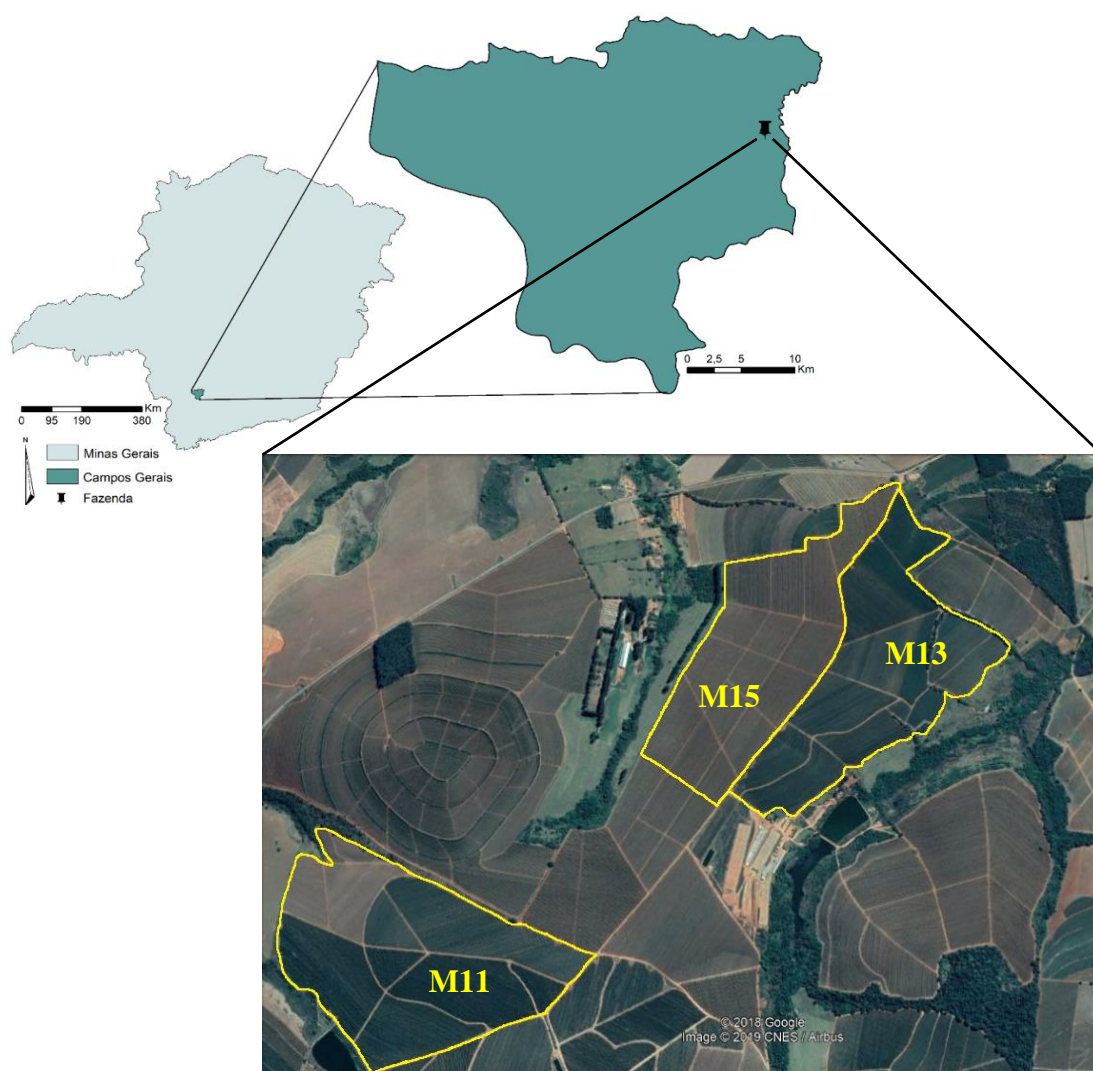
## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo foi conduzido em lavouras cafeeiras pertencentes à Fazenda Pinheiros, situada no município de Campos Gerais-MG (Figura 1). O clima é classificado como Cwa segundo Alvarez et al. (2013), sendo a temperatura média anual de 19,5°C e precipitação média de 1.450 mm ano<sup>-1</sup>. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho (SANTOS et al., 2013), sendo cultivado com cafeeiros das variedades Catuai e Acaia, irrigados por gotejamento. No manejo da lavoura cafeeira durante as estações do ano são usados tratores cafeeiros durante a adubação da área, controle de plantas daninhas, controle de pragas e doenças, entre outras atividades necessárias como a poda do cafeeiro. Também em época de colheita ocorre o uso das colhedoras, sendo usando a carreta de arraste acoplada no trator dependendo do tipo da colhedora.

O tráfego do maquinário na lavoura cafeeira para práticas de manejo durante o ciclo anual de produção consiste em 12 a 18 passadas no mesmo local, incluindo controle de plantas daninhas, adubação e controle de pragas e doenças, podendo ocorrer mais passadas dependendo da incidência de doenças na lavoura. Na época da colheita, o tráfego inclui as passadas da colhedora, sendo uma ou duas vezes dependendo do manejo adotado (com ou sem repasse mecanizado) e também o tráfego do transbordo (trator arrastando a carreta que acompanha a colhedora), sendo o número de passadas variável em função da produtividade da lavoura cafeeira (maior produtividade, maior número de operações de transbordo). Dependendo da idade da lavoura cafeeira, pode ocorrer também tráfego do maquinário executando podas, como no caso do esqueletamento. Diante dessas situações, não há um número exato de passadas no mesmo local durante o ciclo anual da lavoura cafeeira.



Figura 1 - Localização da fazenda no município de Campos Gerais e detalhes das áreas amostradas.



Legenda: M11: manejo com 11 anos; M13: manejo com 13 anos; M15: manejo com 15 anos.  
Fonte: Do Autor (2018).

As áreas amostradas foram divididas conforme o tempo de manejo da lavoura, sendo identificadas como M11, M13 e M15, que correspondem a 11, 13 e 15 anos de manejo, respectivamente. Para cada idade de manejo, coletou-se amostras indeformadas em três classes de declividade, sendo denominado de relevo plano (0 a 3% de declividade), relevo suave-ondulado (3 a 8% de declividade) e relevo ondulado (declividade de 8 até o máximo observado de 16%), identificadas como classes de declividades I, II e III respectivamente. Em um mesmo ponto da lavoura cafeeira, foram coletadas amostras com estrutura preservada no centro da entrelinha (EL), no local de tráfego do maquinário, sendo denominados de rodado de cima (RC) e rodado de baixo

(RB). Para cada um desses pontos amostrais, coletou-se amostras em três camadas no perfil de solo.

As camadas amostradas foram de 0 a 3 cm, de 10 a 13 cm e de 25 a 28 cm. Todas as amostras indeformadas foram coletadas em cilindros volumétricos com altura e diâmetro de 23,5 e 65 mm respectivamente, com auxílio do amostrador de Uhland, de maneira que a estrutura das amostras permaneceu com as características de campo. Após a coletas, estas foram envoltas em um filme plástico e conduzidas ao laboratório para os demais procedimentos. Foram coletadas 567 amostras para elaboração dos modelos de capacidade de suporte de carga (3 idades x 3 declividades x 3 camadas x 21 repetições) e 1080 amostras para avaliação do impacto do maquinário agrícola (3 idades x 3 declividades x 3 camadas x 2 rodados x 20 repetições) em cilindros volumétricos, sendo usado o excesso de solo desses cilindros para análises de textura, densidade de partículas e matéria orgânica do solo.

No laboratório, as amostras foram preparadas, retirando o excesso de solo, de maneira que o volume do solo a ser avaliado correspondesse ao volume do cilindro. As amostras foram então saturadas e empregadas na determinação das curvas de retenção de água utilizando as unidades de sucção (Funis de Büchner) para as tensões de -2, -4 e -6 kPa e os extratores de Richards para as tensões de -10, -33, -100, -500 e -1500 kPa. Determinou-se também a porosidade total, a macroporosidade e microporosidade. Os resultados da curva de retenção de água foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980). Com o excesso de solo retirado dos cilindros contendo as amostras foram feitas análises de textura pelo método da pipeta, de densidade de partículas pelo método do picnômetro (DONAGEMMA et al., 2017), cujos resultados encontram-se na Tabela 1, e de matéria orgânica pela oxidação com  $K_2Cr_2O_7$  (FONTANA e CAMPOS, 2017).

Para a obtenção da curva de retenção de água foram usadas 81 amostras (3 idades x 3 declividades x 3 camadas x 3 repetições) com estrutura preservada coletadas na entrelinha do rodado dos equipamentos e 108 amostras (3 idades x 3 declividades x 3 camadas x 2 rodados x 3 repetições) com estrutura preservada nos locais dos rodados do maquinário. Na avaliação da densidade de partículas e textura, foi utilizado o excesso de solo retirado de 81 amostras (3 idades x 3 declividades x 3 camadas x 3 repetições). Para a análise de matéria orgânica do solo, foi utilizado o excesso de solo retirado de 243 amostras (3 idades x 3 declividades x 3 camadas x 3 condições de amostragem x 3 repetições).

Tabela 1 - Resultados médios de três repetições de textura e densidade de partículas (Dp) do Latossolo Vermelho cultivado com lavoura cafeeira.

Idades	Camadas (cm)	Dp (g cm <sup>-3</sup> )	Argila (g kg <sup>-1</sup> )	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Areia (g kg <sup>-1</sup> )	Classe Textural
M11	0 - 3	2,68	460	337	204	Argiloso
	10 - 13	2,68	537	273	190	Argiloso
	25 - 28	2,68	543	261	197	Argiloso
M13	0 - 3	2,68	441	383	177	Argiloso
	10 - 13	2,68	543	333	124	Argiloso
	25 - 28	2,68	575	310	115	Argiloso
M15	0 - 3	2,68	447	390	164	Argiloso
	10 - 13	2,68	576	321	104	Argiloso
	25 - 28	2,68	649	254	97	Muito Argiloso

Legenda: M11: manejo 11 anos; M13: manejo 13 anos; M15: manejo 15 anos.

O solo em estudo foi classificado como argiloso, sendo um solo muito explorado com cafeicultura na região sul do estado de Minas Gerais.

Este estudo foi realizado nas condições de manejo da lavoura cafeeira em campo, sendo os resultados analisados com auxílio do programa estatístico R e do SISVAR.

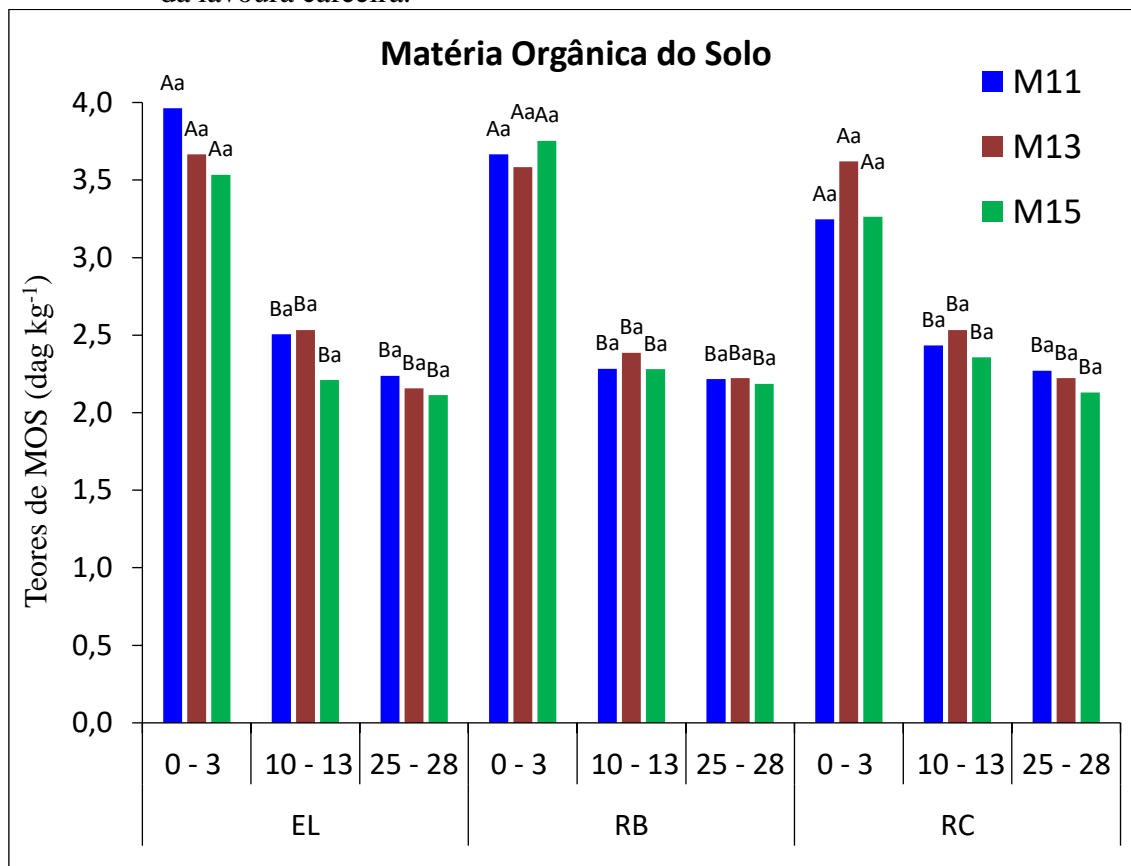
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Matéria Orgânica do Solo

A lavoura cafeeira em seus processos fisiológicos apresenta queda de folhas no seu ciclo produtivo, que tendem a permanecer na camada superficial do solo e contribuindo para o aumento dos teores de matéria orgânica, principalmente na camada superficial do solo. Além das folhas oriundas do cafeeiro, outras espécies de plantas na entrelinha denominadas de invasoras podem contribuir para o aumento desses teores na superfície do solo. Devido a esses fatores, o acúmulo nos teores de matéria orgânica pode ser observado na camada de 0 a 3 cm do solo em comparação com as demais camadas avaliadas. Solos com cobertura vegetal elevada, podem aumentar os teores de matéria orgânica no solo, as atividades biológicas e os índices de resíduos orgânicos do

solo (MARTINS NETO e MATSUMOTO, 2010) devido a sua constante produção de biomassa (COGO et al., 2013).

Figura 2 - Teores de Matéria Orgânica do Solo (MOS) nas diferentes idades de manejo da lavoura cafeeira.



Legenda: EL: Entrelinha; RB: Rodado de Baixo; RC: Rodado de Cima; M11: manejo com 11 anos; M13: manejo com 13 anos; M15: manejo com 15 anos. Médias com letras maiúsculas comparando as camadas dentro de cada condição das idades e; médias com letras minúsculas comparando as idades em cada camada não diferem estatisticamente pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2019).

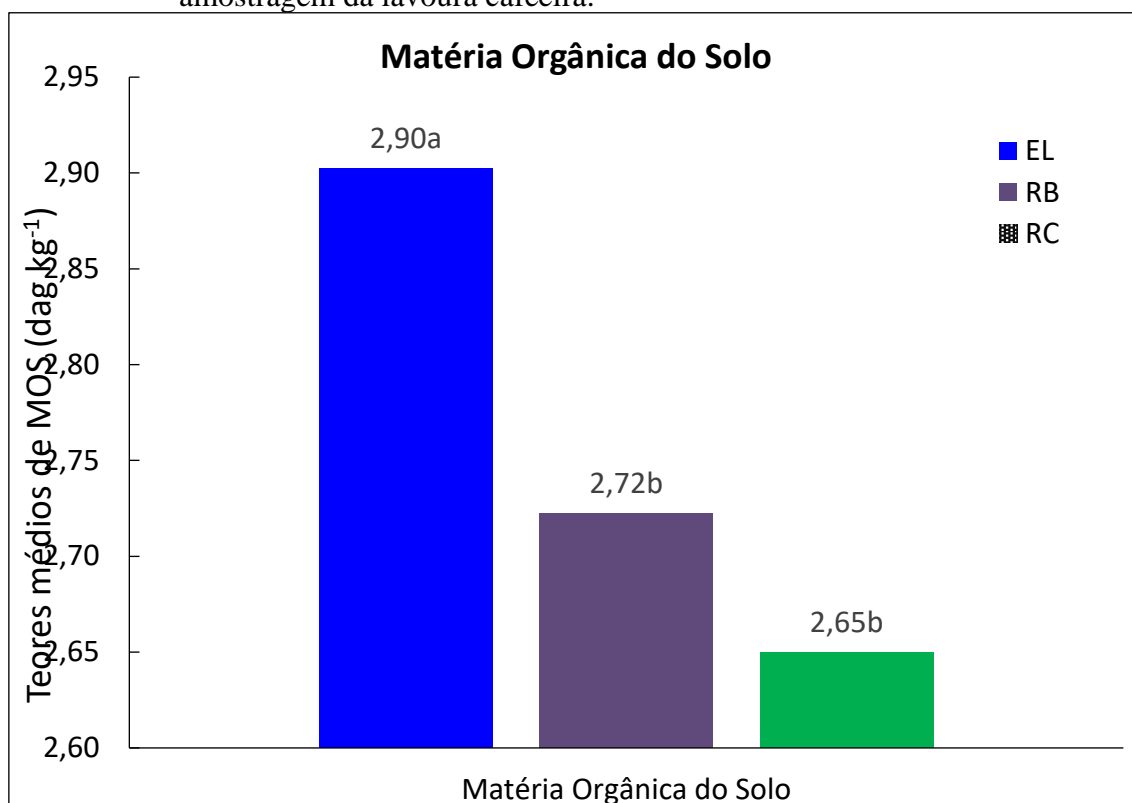
Não foram observadas diferenças significativas nos teores de matéria orgânica entre as idades avaliadas em função da proximidade das idades de manejo, as quais são onze, treze e quinze anos. Resultados diferentes foram encontrados por IORI et al. (2014b) onde avaliaram os teores de matéria orgânica em lavouras cafeeiras com idades de dois, sete, dezoito e trinta e três anos de manejo, sendo a idade com dezoito anos com maiores teores de matéria orgânica. Cogo et al. (2013) avaliaram os estoques de carbono orgânico do solo em um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, cultivado com cafeeiros e submetido a diferentes manejos de plantas invasoras no sul de

Minas Gerais, verificaram uma perda de aproximadamente 20% nos estoques de carbono orgânico em comparação com a mata nativa numa camada de 0-30 cm quando se utilizou herbicida de pós-emergência, enxada rotativa, capina manual e grade, e perdas de 35%, quando se utilizou herbicida de pré-emergência, o que contribui para menor agregação do solo.

A matéria orgânica foi maior na camada superficial em relação à camada de 10 a 13 cm e de 25 a 28 cm devido ao resto de galhos, ramos e folhas secas que acumulam na superfície do solo, conferindo maior aporte de matéria orgânica. Segundo Zinn, Lal e Resck (2005), culturas como a lavoura cafeeira, não ocorrem perdas de carbono orgânico do solo (COS) em comparação com áreas de culturas anuais devido à ausência de preparo do solo nessas áreas de culturas perene. Também a produção de biomassa favorece a manutenção do COS nesses tipos de culturas (COGO et al., 2012).

Os teores de matéria orgânica não apresentaram diferença significativa nas camadas avaliadas, sendo comparados apenas em função da posição de amostragem (Figura 3). A ausência de diferença entre declividade e idades de manejo pode ser explicada pelo efeito somado do longo tempo de manejo adotado (acima de 11 anos), à pequena diferença de idade entre as lavouras avaliadas (dois anos de diferença entre idades consecutivas) e à textura argilosa e muito argilosa dos solos. No estudo de Iori et al. (2014b), avaliando os teores de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho-amarelo manejados com lavoura cafeeira e relevo inclinado, foi observado menor percentual de matéria orgânica no rodado de cima em locais com declividade entre 9 a 15%. Tal fato, pode estar associado ao carreamento dos restos de folhas do rodado de cima para a entrelinha e para o rodado de baixo por meio da enxurrada nos períodos chuvosos e da declividade do terreno.

Figura 3 - Percentual de Matéria Orgânica do Solo nas diferentes posições de amostragem da lavoura cafeeira.



Legenda: EL: Entrelinha; RB: Rodado de Baixo; RC: Rodado de Cima.

Fonte: Do autor (2019).

Já na entrelinha do cafeeiro, o controle de plantas invasoras e a varrição das folhas secas da linha de cultivo no período que antecede a colheita, são depositados nesses locais, ocorrendo um acúmulo de resíduos vegetais. Isso pode contribuir para o aumento dos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, maiores teores de carbono orgânico na entrelinha (Figura 3). Esse resultado é o oposto do encontrado por Iori et al. (2014b) em que o rodado de baixo apresentou maior percentual de matéria orgânica do que a entrelinha em locais de relevo inclinado. Em outros trabalhos como o de Gontijo et al. (2008), os teores de matéria orgânica não diferiram em comparação dos rodados com a entrelinha em uma mesma declividade do terreno.

### 3.2 Atributos físicos

A idade de manejo foi o fator que mais afetou as propriedades físicas do solo, tendo explicado 23,6%, 16,8% e 19,9% da soma de quadrados da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro) e porosidade total (Pt), respectivamente (Tabela 2). O tempo de adoção do manejo é um importante fator que condiciona a qualidade física do solo em lavouras cafeeiras (MARTINS et al., 2012; IORI et al., 2014b). Aproximadamente metade da soma de quadrados permaneceu no resíduo para os atributos físicos avaliados, possivelmente devido ao grande número de amostras empregadas e à variabilidade espacial que se observa para esses atributos físicos em lavouras cafeeiras (SANTOS et al., 2017). A posição de amostragem foi a segunda fonte de variação mais importante, retendo entre 7,2% e 9,9% da soma de quadrados para Ds, Macro, Pt e capacidade de água disponível (CAD), enquanto para microporosidade (Micro) seu efeito foi menor, com apenas 3,6% da soma de quadrados. Efeito significativo da posição de amostragem em lavouras cafeeiras também foi observado por Gontijo et al. (2008) e Iori et al. (2014a) para esses atributos físicos como a Ds, Pt e Macroporosidade. A interação dupla Idade\*Posição foi significativa para a Ds e CAD e a interação Posição\*Camada foi significativa para macro e microporos. As interações triplas e quádrupla não tiveram efeito significativo.

Tabela 2 - Porcentagem da soma de quadrados da análise de variância retida em cada fonte de variação para densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (Pt) e capacidade de água disponível (CAD). (Continua).

Fontes de variação	Ds	Macro	Micro	Pt	CAD
Idade	23,6**	16,8**	4,7**	19,9**	3,6**
Posição	7,2**	9,9**	3,6**	8,8**	7,7**
Camada	0,8	0,9	5,2**	0,9	5,5**
Declividade	0,3	0,6	0,6	0,3	1,8
Idade: Posição	3,0*	2,2	1,3	2,6	9,2**
Idade: Camada	0,6	1,8	2,4	0,6	0,8
Posição: Camada	1,3	4,5**	4,9**	1,4	1,6
Idade: Declividade	1,3	2,1	2,2	1,3	1,3
Posição: Declividade	0,2	0,4	0,9	0,2	0,3
camada: Declividade	2,3	1,4	0,0	2,5	0,3
Interações triplas	7,8	8,0	12,2	7,9	6,1

Tabela 2 - Porcentagem da soma de quadrados da análise de variância retida em cada fonte de variação para densidade do solo (Ds), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (Pt) e capacidade de água disponível (CAD). (Conclusão).

Fontes de variação	Ds	Macro	Micro	Pt	CAD
Interação quádrupla	3,3	6,3	8,5	3,4	3,6
Resíduo	48,3	45,1	53,5	50,3	58,2

Legenda: \*\* Significativo ao nível de 1%; \* Significativo ao nível de 5%.

Fonte: Do autor (2018).

O efeito da declividade de terreno não foi significativo na variação da densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e capacidade de água disponível para as três camadas avaliadas. Essa ausência de diferença significativa na densidade do solo nas posições do rodado de baixo e no rodado de cima pode ser atribuído à aplicação das mesmas pressões todos os anos, induzindo ao solo uma deformação máxima promovida por essas pressões, não havendo, portanto, diferenças significativas nas diferentes declividades de terreno. Esses resultados diferem dos obtidos por Iori et al. (2014b), que observaram diferenças significativas na densidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cafeicultura com até 15% de declividades de terreno.

Observa-se que houve aumento da densidade do solo e redução da porosidade total nos rodados em comparação com a entrelinha nas camadas de 0 a 3 cm e de 10 a 13 cm para a idade M11 (Tabela 3). Também houve aumento da densidade do solo e redução da porosidade total no rodado de cima para essas mesmas camadas na idade M13, o que não foi constatado no rodado de baixo em comparação com a entrelinha. Não houve alteração significativa na densidade do solo e porosidade total em todas as camadas avaliadas para os rodados de cima (RC) e de baixo (RB) e para a entrelinha (EL) da idade M15. Já na camada de 25 a 28 cm os valores de densidade do solo, macroporosidade e microporosidade não diferiram estatisticamente indicando que as pressões aplicadas pelo tráfego do maquinário na superfície do solo não atingiram esta camada. Foi observado também nessa camada, uma redução somente na porosidade total para o rodado de cima na idade M13 e nos dois rodados para a idade M15 quando comparados com a EL. Analisando as idades de manejo, tanto no rodado de baixo quanto no rodado de cima e na entrelinha, independente da declividade do terreno em todas as camadas avaliadas, a menor densidade apresentada foi na idade M15 pode ser um indicativo da recuperação natural da estrutura ao longo do tempo que promoveu um



melhor rearranjo das partículas do solo, conforme indicado pelos maiores valores de porosidade total e macroporosidade. A idade M13 apresentou maior densidade do solo, mas sem diferença significativa com os rodados da idade M11 e menor porosidade total em relação às demais idades em todas as camadas avaliadas. Porém na EL, a densidade do solo na idade M11, foi menor que os valores da idade M13 e maiores que os valores da idade M15.

A idade M15 apresentou maiores valores de porosidade total e macroporosidade quando se comparou as diferentes idades de manejo EL, RC e RB em cada camada. Na idade M11 a porosidade total e a macroporosidade foi maior que a idade M13 e menor que a idade M15, com exceção da macroporosidade para o RB da idade M13 na camada de 0 a 3 cm que apresentou mesmo valor. Na idade M13 a macroporosidade foi a menor em relação às demais idades e em todas as camadas avaliadas, com exceção do RB na camada de 0 a 3 cm, a qual não apresentou diferença estatística com a idade M11 e ambas, menores do que a idade M15.

Para macroporosidade e microporosidade, não houve diferença significativa entre os rodados e a entrelinha na camada de 10 a 13 cm e 25 a 28 cm para as idades de manejo M11, M13 e M15, exceto para o rodado de cima na camada de 10 a 13 cm com treze anos de manejo (M13), sendo o RC com menor macroporosidade e maior microporosidade em relação à EL e ao RB. As alterações na macroporosidade ocorreram principalmente na camada de 0 a 3 cm para os rodados em relação com a EL que apresentaram maiores valores de macroporosidade na EL da idade M11 e M15, sendo a idade M13 com valores iguais estatisticamente na EL e RB, e maiores que o RC.

Comparando-se as diferentes camadas para a macroporosidade em cada posição de amostragem, não houve diferença significativa entre as camadas nas posições rodado de baixo e entrelinha. No rodado de cima, a macroporosidade foi significativamente maior na camada de 25 a 28 cm, sendo menor na camada de 0 a 3 cm, indicando que nessa posição de amostragem houve efeito sobre a qualidade física do solo, porém superficial.

Tabela 3 - Valores médios dos atributos físicos avaliados em diferentes idades de manejo (11, 13 e 15 anos, respectivamente M11, M13 e M15), posições de amostragem (entrelinha, rodado de baixo, RB, e rodado de cima, RC) e camadas (0 - 3 cm, 10 - 13 cm, 25 - 28 cm).

Idade	Camada de 0 - 3 cm			Camada de 10 - 13 cm			Camada de 25 - 28 cm		
	EL	RB	RC	EL	RB	RC	EL	RB	RC
----- Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> ) -----									
M11	1,02 Bb	1,18 Aa	1,21 Aa	1,10 Bb	1,17 Aa	1,16 Aa	1,07 Ba	1,14 Aa	1,13 Aa
M13	1,12 Ab	1,13 Ab	1,22 Aa	1,15 Ab	1,19 Ab	1,20 Aa	1,16 Aa	1,17 Aa	1,18 Aa
M15	0,99 Ca	1,06 Ba	1,08 Ba	1,04 Ca	1,08 Ba	1,08 Ba	1,04 Ca	1,06 Ba	1,07 Ba
----- Porosidade total (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----									
M11	0,62 Ba	0,57 Bb	0,55 Bb	0,59 Ba	0,56 Bb	0,56 Bb	0,60 Ba	0,59 Ba	0,58 Ba
M13	0,58 Ca	0,58 Ca	0,52 Cb	0,57 Ca	0,56 Ca	0,51 Cb	0,57 Ca	0,56 Ca	0,54 Cb
M15	0,63 Aa	0,60 Aa	0,60 Aa	0,61 Aa	0,60 Aa	0,61 Aa	0,61 Aa	0,61 Ab	0,60 Ab
----- Macroporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----									
M11	0,23 Baα	0,16 Bbα	0,12 Bby	0,22 Baα	0,17 Baα	0,20 Baβ	0,22 Baα	0,22 Baα	0,20 Baα
M13	0,21 Caα	0,16 Baα	0,08 Cby	0,19 Caα	0,17 Caα	0,09 Cbβ	0,14 Caα	0,15 Caα	0,13 Caα
M15	0,25 Aaα	0,20 Abα	0,18 Aby	0,24 Aaα	0,21 Aaα	0,23 Aaα	0,23 Aaα	0,22 Aaα	0,20 Aaβ
----- Microporosidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----									
M11	0,39 Baα	0,41 Baα	0,43 Baα	0,37 Baα	0,39 Baα	0,36 Baβ	0,38 Baα	0,37 Baα	0,37 Baβ
M13	0,37 Abα	0,42 Aaα	0,44 Aaα	0,38 Abα	0,39 Abα	0,43 Aaβ	0,42 Aaα	0,41 Aaα	0,41 Aaβ
M15	0,38 Bbα	0,41 Baα	0,42 Baα	0,37 Baα	0,38 Baα	0,38 Baβ	0,38 Baα	0,39 Baα	0,40 Baβ
----- Capacidade de água disponível (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----									
M11	0,103 Aaα	0,107 Aaα	0,109 Aaα	0,087 Aaβ	0,098 Aaβ	0,099 Aaβ	0,093 Aaβ	0,092 Aaβ	0,087 Aaβ
M13	0,089 Aaα	0,103 Aaα	0,091 Aaα	0,076 Aaβ	0,069 Aaβ	0,088 Aaβ	0,091 Aaβ	0,092 Aaβ	0,080 Aaβ
M15	0,074 Bbα	0,105 Aaα	0,103 Aaα	0,048 Bbβ	0,094 Aaβ	0,096 Aaβ	0,064 Bbβ	0,097 Aaβ	0,099 Aaβ

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna para cada atributo do solo (Ds, Pt, Ma, Mi, CAD) comparando idades; médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha em cada camada comparando as posições de amostragem e; médias seguidas pela mesma letra grega em cada rodado comparando as camadas amostradas, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. M11: Manejo 11 anos; M13: Manejo 13 anos; M15: Manejo 15 anos; EL: entrelinha; RB: Rodado de Baixo; RC: Rodado de cima.

Fonte: Do autor (2019).

Observa-se que na camada superficial, há mais microporos na posição dos rodados em relação à EL, com exceção na idade M11, em que não houve diferença na microporosidade. Esse fato é um indicativo do efeito do tráfego de máquinas sobre a porosidade do solo, onde ocorreu uma redução da porosidade total e dos macroporos e; possivelmente, uma pequena parte de macroporos se transformam em microporos e outra parte dos macroporos deixaram de existir quando submetidos a aplicação de cargas no solo, indicando que no campo, uma redução na macroporosidade não se transforma em um aumento proporcional de microporosidade do solo. Entre as idades de manejo, a idade M13 apresentou a maior microporosidade e as idades M11 e M15 não apresentaram diferença significativa em todas as posições e camadas avaliadas.

Comparando as camadas, a diferença foi observada somente no RC, onde a camada de 0 a 3 cm apresentou maior microporosidade nas três idades do que as camadas de 10 a 13 cm e 25 a 28 cm, as quais foram iguais estatisticamente. Para as demais camadas, não houve diferença para a EL e o RB nas camadas de 0 a 3 cm e de 10 a 13 cm nas três idades de manejo.

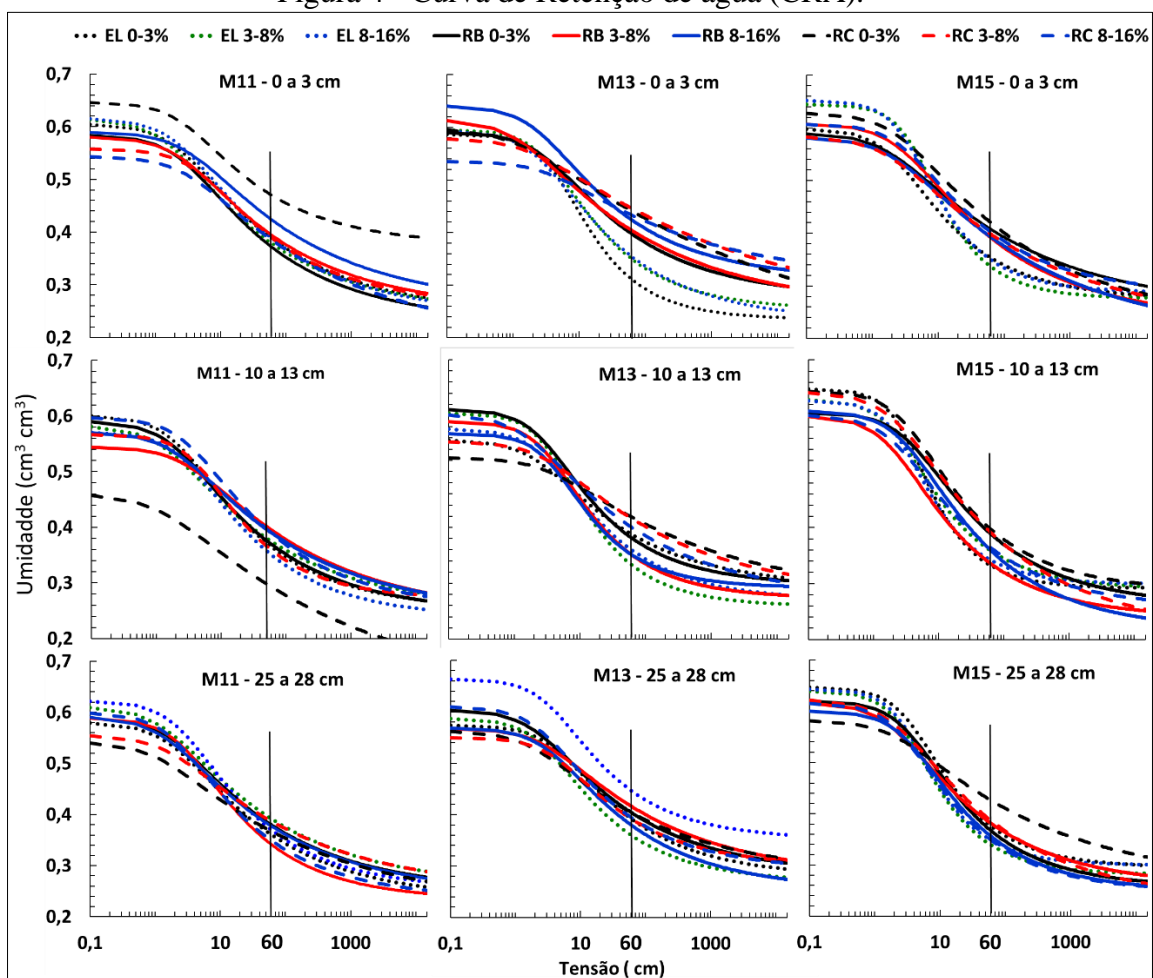
A capacidade de água disponível (CAD) na entrelinha do manejo de M15 foi a menor em relação às idades M11 e M13 em todas as camadas avaliadas. Nos rodados de baixo e de cima, não houve diferença significativa entre as idades de manejo em todas as camadas. A CAD da idade M11 e M13 não apresentaram diferenças na comparação da entrelinha, do rodado de baixo e de cima em todas as camadas avaliadas. Na idade M15, a entrelinha apresentou menor CAD em comparação com o rodado de baixo e de cima em todas as camadas avaliadas.

Na comparação das camadas nas idades avaliadas, a camada de 0 a 3 cm apresentou maior CAD, tanto para a EL, RB e RC, nas três idades avaliadas em comparação com as camadas de 10 a 13 cm e de 25 a 28 cm. Os maiores teores de matéria orgânica do solo na camada de 0 a 3 cm podem ter influenciado nessa maior disponibilidade de água nessa camada. Também o sistema de irrigação localizada instalado na lavoura cafeeira no ato de sua implantação, fornecendo água diretamente na linha das plantas, pode acarretar maior quantidade de água na superfície do solo, o que pode favorecer a retenção de água pela matéria orgânica do solo. Esses resultados de porosidade total, macroporosidade, microporosidade e CAD também foram observados na curva de retenção de água (CRA).

### 3.3 Curva de Retenção de Água

As curvas de retenção de água (Figura 4) apresentaram comportamento característico, com o ponto de inflexão da curva próximo à capacidade de campo, considerando como água retida a -60 kPa. Em todos os gráficos, há uma divisão entre a macro e a microporosidade, sendo as maiores tensões representando a macroporosidade e as tensões menores, a microporosidade.

Figura 4 - Curva de Retenção de água (CRA).



Legenda: A linha vertical no meio do gráfico divide a porosidade total em porosidade total e microporosidade, sendo menores tensões representando a macroporosidade e as maiores representando a microporosidade.

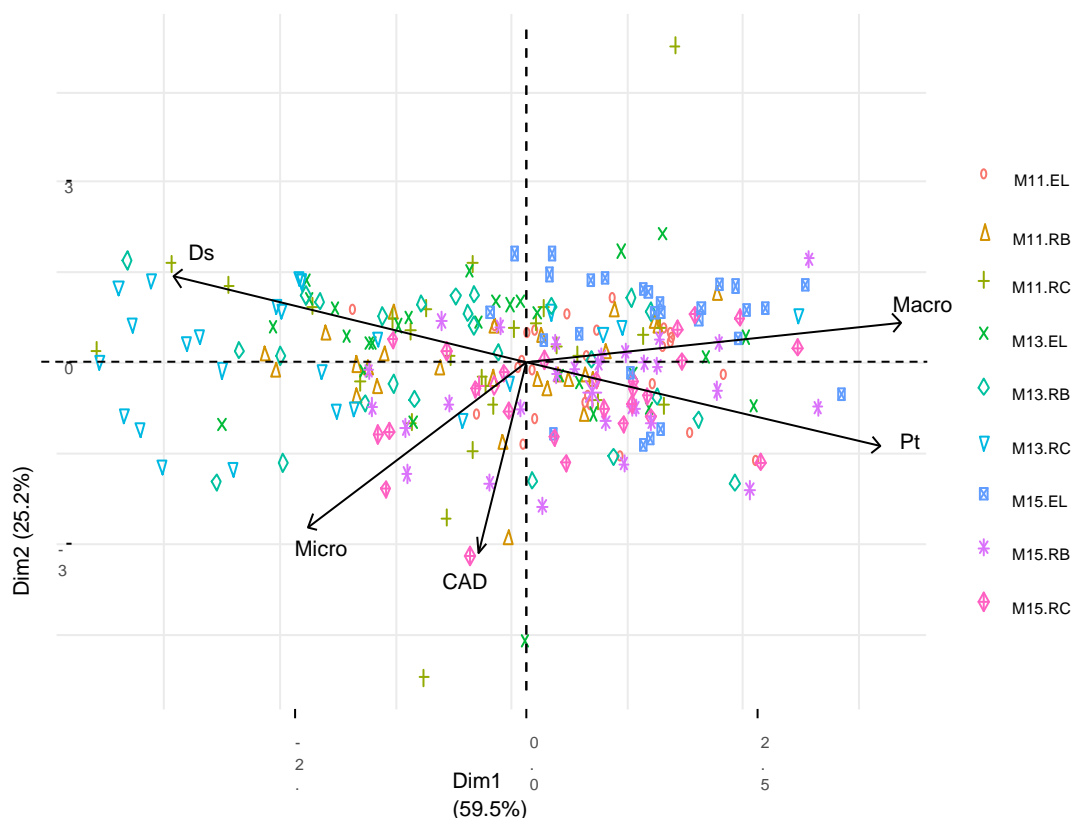
Fonte: Do autor (2019).

Na declividade de 0 a 3% o M11 apresentou maior capacidade de retenção de água no rodado de cima para a camada de 0 a 3 cm e menor capacidade na camada de 10 a 13 cm, sendo a camada de 25 a 28 cm com menor quantidade de macroporos.

A CRA do M11 indica que a microporosidade é muito pequena, com baixa capacidade de armazenamento de água, sendo necessário uma irrigação constante para atender a demanda da planta (Figura 4). Mesmo comportamento foi observado no M13, sendo que a camada de 0 a 3 cm apresentou menor capacidade de armazenamento de água na entrelinha quando comparado com os dois rodados dos equipamentos.

Os resultados apresentados na Tabela 4 foram usados na Análise de Componentes Principais (Figura 5). Os dois primeiros componentes principais (CP) retiveram 84,7% da variabilidade total dos dados. O CP 1 (59,5% da variabilidade) foi definido principalmente por densidade do solo, macroporosidade e porosidade total enquanto o CP 2 foi definido principalmente pela capacidade de água disponível (CAD). A densidade do solo e a macroporosidade apresentaram estreita relação (setas quase na mesma direção, porém em sentidos opostos), indicando que a variação na compactação do solo afeta principalmente os poros maiores, responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo.

Figura 5 - Biplot da Análise de Componentes Principais



Legenda: Código das 245 amostras coletadas para a realização deste trabalho, de acordo com a idade de manejo (M11, M13 e M15 para 11, 13 e 15 anos, respectivamente) e posição de amostragem (entrelinha, rodado de baixo e rodado de cima, respectivamente EL, RB e RC).

Fonte: O autor (2019).

O manejo M13 apresentou a maior quantidade de amostras à esquerda do gráfico associado a maiores valores de densidade do solo menores valores de macroporosidade. Os manejos M11 e M15 apresentaram pouca distinção entre si. No manejo M13 as amostras do rodado de cima situaram-se na extrema esquerda do componente principal 1, indicando que aí foram observados os maiores valores de densidade do solo e os menores valores de macroporosidade. O manejo M11 apresentou pouca distinção entre as posições de amostragem. No manejo M15 houve distinção entre as posições de amostragem principalmente no segundo componente principal indicando que as amostras de entrelinhas apresentaram menor CAD e as amostras dos rodados apresentaram maior microporosidade e maior CAD.

Observa-se que as amostras associadas à idade de manejo M13 e à posição RC concentraram-se no extremo esquerdo do gráfico, associado a maiores valores de Ds e micro e menores valores de macro e Pt. Os pontos associados à idade M15 ocuparam mais comumente a porção direita do gráfico, inclusive a maioria das amostras coletadas sob os rodados (sem clara distinção entre RC e RB). Nessa posição do gráfico também se concentraram a maioria das amostras de EL, ainda que uma quantidade expressiva de amostras nessa posição associada à idade M13 tenha permanecido à esquerda da origem também.

Os resultados podem ser explicados pela densidade do solo em que o manejo na idade M13 foi a idade que apresentou maior a densidade do solo. A idade M15 é a que apresentou menores valores de CAD e Micro e, a idade M13 maior CAD e microporosidade. A grande concentração das amostras no centro do gráfico indica que as amostras apresentam comportamentos próximos, provavelmente devido as idades de manejo.

## 4 CONCLUSÕES

A declividade do terreno não apresentou diferença na avaliação desses atributos do solo avaliados.

Nos rodados dos equipamentos houve aumento da densidade do solo e redução da macroporosidade nas camadas de 0 a 3 cm e de 10 a 13 cm.

A microporosidade foi maior na idade M13 em relação às idades M11 e M15 e na camada de 0 a 3 cm no rodado de cima para as três camadas avaliadas.

A idade M13 na entrelinha apresentou menor capacidade de água disponível.

Os teores matéria orgânica foram maiores na entrelinha da lavoura cafeeira em relação aos rodados de baixo e de cima.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Barzil**. Meteorologische Zeitschrift, 2013; v. 22, n. 6, p. 711-728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- BLUM, J.; GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; GUEDES FILHO, O.; SILVA, S. G. C.; EBERHARDT, D. N.; ARAÚJO, S. R. Assessment of soil physical attributes at sowing row and inter-row under no-till system. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE; v. 45, n. 5 p. 888-895, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-66902014000500004>.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; ROSSONI, D. F.; COSTA, A. L.; OLIVEIRA, L. M. Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB; v. 18, n. 3, p. 270-278, mar. 2014.
- COGO, F. D.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; ZINN, Y. L.; DIAS JUNIOR, M. S.; ALCÂNTARA, E. N.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoques de carbono orgânico do solo em cafezais sob diferentes sistemas de controle de plantas invasoras. (In Portuguese, with English abstract). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR; v. 34, p. 1089-1098, 2013.
- COGO, F. D.; NANMETTI, D. C.; DO CARMO, D. L.; LACERDA, T. M.; NANMETTI, A. N. Carbono orgânico de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros em sistemas de manejo agroflorestal e convencional. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, MG; v. 4, p. 21-30, 2012.
- CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N.; PIMENTA, W. A.; PATROCÍNIO, A. P.; SOUZA, E. B.; NAGAHAMA, H. Avaliação da intensidade de tráfego de tratores em alguns

atributos físicos de um Argissolo Amarelo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 38, p. 1000-1010, 2014.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário da ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90p.

DONAGEMMA, G. K.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. Densidade de Partículas. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos; p. 76-81, 2017.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono orgânico. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos; p. 360-367, 2017.

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M. DE S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Atributos físico-hídricos de um Latossolo de cerrado em diferentes posições de amostragem na lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 32, p. 2227-2234, 2008.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; SOUZA, Z. R.; FIGUEIREDO, V. C. Seasonal change of soil precompression stress in coffee plantation under sub-humid tropical condition. **Coffee Science**, Lavras, MG; v. 9, p. 145-154, 2014a.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; ABREU JÚNIOR, A. A. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 38, n. 1, p. 107-117, 2014b.

JEMAI, I.; BEN AISSA, N.; BEN GUIRAT, S.; BEN-HAMMOUDA, M.; GALLALI, T. Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry sub humid Tunisian climate. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL; v. 126, p. 26-33, 2013.

KOESTEL, J.; DATHE, A.; SKAGGS, T. H.; KLAKEGG, O.; AHMAD, M. A.; BABKO, M.; GIMÉNEZ, D.; FARKAS, C.; NEMES, A.; JARVIS, N. Estimating the permeability of naturally structured soil from percolation theory and pore space characteristics imaged by X-ray. **Water Resources Research**, Washington, US; v. 54, ed. 11, p. 9255-9263, nov. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018WR023609>.

MARTINS NETO, F. L.; MATSUMOTO, S. N. Qualidade do solo e nutrição de plantas em sistemas de produção de café (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, MG; v. 5, n. 3, p. 206-213, 2010.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; ANDRADE, M. L. C.; GUIMARÃES, P. T. G. Compaction caused by mechanized operations in a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee over time. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, MG; v. 36, p. 391-398, 2012.



NAGAHAMA, H. J.; GRANJA, G. P.; CORTEZ, J. W.; RAMOS, R. L.; ARCOVERDE, S. N. S. Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, Viçosa, MG; v. 63, p. 741-746, 2016.

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

OLIVEIRA, G. G.; OLIVEIRA, G. C.; SILVA, E. A.; CARDUCCI, C. E.; BARBOSA, S. M.; SILVA, B. M. Indicadores de qualidade física para Argissolos sob pastagens nas regiões leste e sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, PE; v. 58, n. 4, p. 388-395, 2015.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma** Amsterdam, NL; v. 110, p. 131-146, 2002.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. Physical quality of a Latosol under no-tillage and conventional tillage in the semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, CE; v. 47, n. 3, p. 429-438, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160052>.

SANTOS, E. O. DE J.; GONTIJO, I.; SILVA, M. B. DA; PARTELLI, F. L. Sampling Design of Soil Physical Properties in a Conilon Coffee Field. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG; v. 41, p. 1-13, Apr. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20160426>.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. 2013. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3ª ed. rev. ampl. Brasília, DF. 353p. Embrapa, 2013.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, É. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic Latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL; v. 154, p. 103-113, 2015b.

SILVA, B. M.; SANTOS, W. J. R.; OLIVEIRA, G. C.; LIMA, J. M.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG; v. 39, p. 39-47, 2015a.

SILVA, B. M.; SILVA, É. A.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant-available soil water capacity: Estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 38, p. 464-475, 2014.

SILVA, E. A.; SILVA, S. H. G.; DE OLIVEIRA, G. C.; CARDUCCI, C. E. Root spatial distribution in coffee plants of different ages under conservation management system. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, p. 4970-4978, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11356.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. S.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB; v.17, n. 12, p. 1301-309, 2013.

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

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL; v. 84, n. 1, p. 28-40, 2005.

## Artigo 2

### **CAPACIDADE DE SUPORTE DE CARGA DE LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM CAFEEIROS E IMPACTO DO MANEJO EM FUNÇÃO DE IDADE, CAMADA, DECLIVIDADE E POSIÇÃO DE AMOSTRAGEM**

### **LOAD BEARING CAPACITY OF A RED LATOSOL UNDER COFFEE PLANTATION AND MANAGEMENT IMPACTS IN DIFFERENT AGES, LAYERS, SLOPES AND SAMPLING POSITIONS**

#### **RESUMO**

O Brasil é o maior produtor mundial de café, com grande movimentação no mercado mundial. No entanto, a produção espalha-se em boa parte do território nacional sendo usado máquinas agrícolas no seu manejo, o que pode acarretar quedas de produtividade da lavoura quando estas máquinas são empregadas de forma inadequada, promovendo a compactação do solo. Desta forma, objetivou-se elaborar modelos de capacidade de suporte de carga para um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros e avaliar o impacto de máquinas agrícolas empregadas no manejo da lavoura nas declividades de 0 a 3%, de 3 a 8% e de 8 a 16% e nas camadas de 0 a 3 cm, de 10 a 13 cm e de 25 a 28 cm, tanto no rodado de cima quanto no rodado de baixo nas áreas inclinadas em idades de 11 anos, 13 anos e 15 anos de manejo. Foram elaborados Modelos de Capacidade de Suporte de Carga específicos, sendo que quatro modelos foram suficientes para representar todas as classes de declividade, as camadas avaliadas e as idades de manejo. Os rodados de baixo e de cima não apresentaram diferença estatística no percentual de amostras compactadas e a lavoura com 15 anos de manejo apresentou maior percentual de amostras compactadas nas camadas de 10 a 13 e de 25 a 28 cm. A lavoura com 13 anos de idade apresentou maior aumento da densidade do solo e o manejo está degradando a estrutura do solo até camada de 25-28 cm.

**Palavras-Chave:** Compactação do solo. Declividade do terreno. Idade de manejo.

## ABSTRACT

Brazil is the world's largest coffee producer and a major player in the global market. Coffee production is spread throughout the country, with an intensive use of farm machinery, which may lead to yield losses if managed improperly, resulting in soil compaction. The aim of this study was to obtain load bearing capacity models for a Red Latosol under coffee plantation and to evaluate the impact of the machinery used in the crop management under different slope conditions (0 to 3%, 3 to 8% and 8 to 16%) and on different soil layers (depths of 0 to 3 cm, 10 to 13 cm and 25 to 28 cm) at the upper and lower traffic lanes on sites aging 11, 13 and 15 years old. Load bearing capacity models specific to each condition were elaborated, with four models being enough to represent all of the slope classes, soil layers and ages. The upper and lower traffic lines did not present significant differences regarding the number of compacted samples, while the 15 years old crop presented the highest proportion of compacted samples in the layers of 10 to 13 cm and 25 to 28 cm. The site of 13 years old presented the highest increase in soil bulk density and the management employed have been degrading soil structure down to the layer of 25 to 28 cm.

**Keywords:** Soil compaction. Terrain slope. Management age.

## 1 INTRODUÇÃO

O café é uma importante commodity agrícola, sendo cultivado em torno de 11 milhões de hectares em mais de 50 países, com produção anual de 155 milhões de sacas de 60 kg, o que representa 9,2 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2019a). O Brasil se destaca como o maior produtor mundial, tendo a safra de 2018 atingido 60 milhões de sacas em uma área de quase dois milhões de hectares (CONAB, 2018). Mundialmente, o mercado de café movimentou em 2016, 20 bilhões de dólares apenas de café verde, atingindo 37 bilhões de dólares incluindo café moído e extrato solúvel (FAOSTAT, 2019b).

A boa produtividade dessas áreas agrícolas é dependente da qualidade física, química e biológica do solo, sendo a qualidade física importante para trocas gasosas e outras funções do solo (RABOT et al., 2018). Segundo Martín et al. (2017) a estrutura do solo é responsável diretamente ou indiretamente por todos os processos do solo, sendo o sistema poroso responsável pela interação entre as fases sólida, líquida e gasosa. Contudo, o manejo empregado nessas áreas em sua grande maioria, requer uso de máquinas e equipamentos agrícolas que podem contribuir para a degradação da qualidade estrutural desses solos (HOLTHUSEN et al., 2018; NUNES et al., 2019).

A qualidade estrutural do solo refere-se ao arranjo das partículas do solo constituindo um ambiente dinâmico, cuja alteração determinará um novo comportamento dos processos que ocorrem no solo (FERREIRA, 2010). Além disso, essa alteração na sua grande maioria promove uma degradação dessa estrutura que dificulta o solo de desempenhar suas funções necessárias ao desenvolvimento das culturas. Para Mueller et al. (2010), a degradação da estrutura influencia negativamente na capacidade produtiva do solo devido a alteração na sua estrutura.

Em áreas com emprego intenso de máquinas e equipamentos agrícolas, é preciso atentar às peculiaridades intrínsecas das classes de solo (ANDRADE et al., 2017; MARTINS et al., 2018) e a época do ano (IORI et al., 2014a). Segundo Stefanoski et al. (2013) manejos adotados visando a produção da lavoura, sem preocupar com as propriedades do solo podem promover alterações destas e na sua resistência mecânica.

Nas áreas dotadas de manejo mecanizado é preciso atentar principalmente para a umidade do solo no ato da execução das atividades, a qual está diretamente relacionada com a capacidade de suporte de carga do solo (IORI et al., 2013). Segundo

Iori et al. (2014a), estudos visando conhecer a umidade ideal para o tráfego de uma determinada máquina agrícola que aplica uma pressão conhecida são de grande importância no intuito de evitar a compactação do solo. Quando esses limites de pressão aplicada ao solo são ignorados, a estrutura do solo em sua grande maioria é degradada comprometendo sua capacidade de desempenhar suas funções no sistema solo.

Além disso, deve ser considerado também durante o manejo nessas áreas produtivas é a frequência do tráfego para não comprometer a qualidade física do solo. Para executar todas as atividades empregadas ao manejo é necessário trafegar no mesmo local várias vezes durante o ciclo produtivo da lavoura. Em se tratando da aplicação de nutrientes, somente a adubação de nitrogênio e potássio são recomendadas 3 ou 4 aplicações no período chuvoso (MESQUITA et al., 2016). Pais et al. (2013), relataram que no controle de plantas daninhas com herbicida, são realizadas em média cinco aplicações por ano e que, na maioria das propriedades são empregados máquinas agrícolas que aplicam cargas no solo. O controle de doenças como a ferrugem e de plantas daninhas no período de dezembro a março (IORI et al., 2014b), que compreende o período chuvoso, pode promover uma maior degradação da estrutura pelas máquinas agrícolas devido a baixa capacidade do solo em suportar cargas. Dessa forma, a intensidade de tráfego pode ser um fator agravante na compactação do solo.

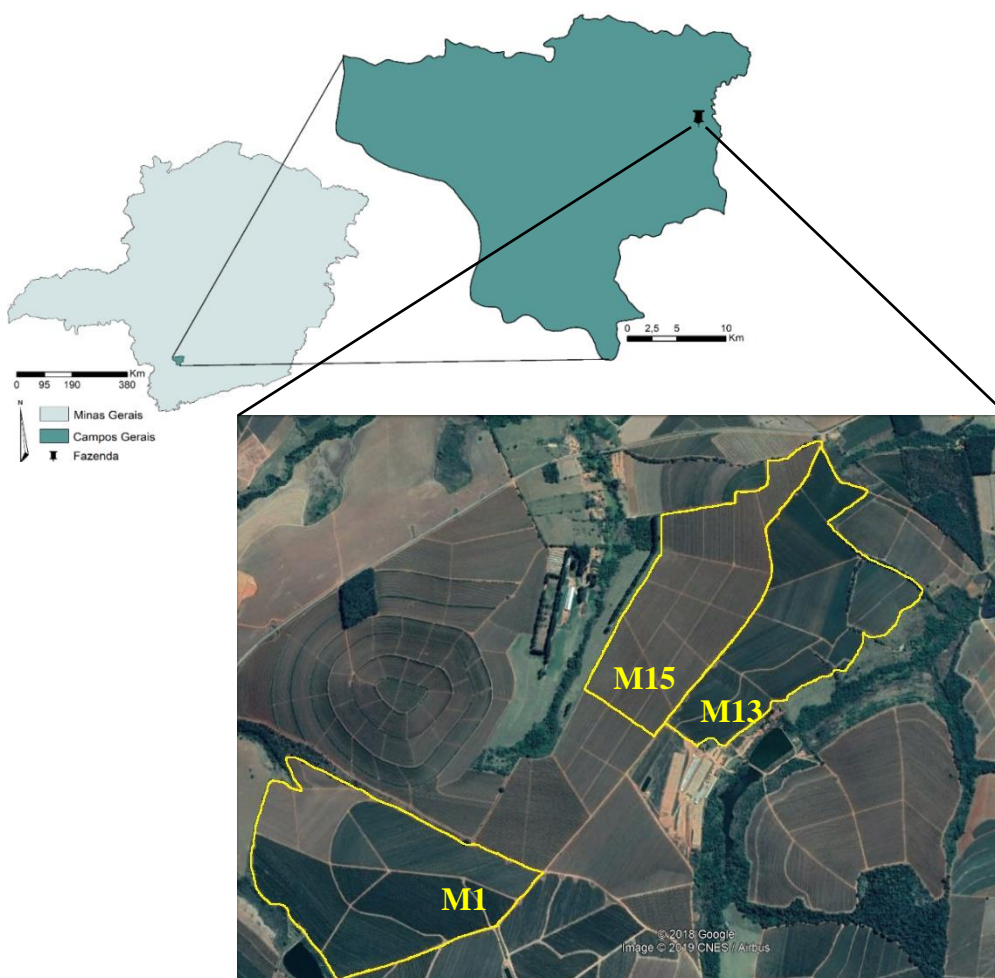
Outro fator que pode ser agravante nas lavouras cafeeiras é a declividade do terreno e o tempo de manejo em função da idade da lavoura. Locais com relevo inclinado e manejado mecanicamente, um lado da linha de tráfego do maquinário pode aplicar maior pressão dinâmica devido ao deslocamento do centro de gravidade da máquina e promover degradação diferente em cada rodado da máquina. Segundo Iori et al. (2014b) o tempo de cultivo e a inclinação da área podem promover alterações na estrutura do solo durante o manejo. O período de produção da lavoura cafeeira pode ser prolongado em função do manejo adotado em anos anteriores de produção. O maior tempo de produção está associado a maior intensidade de tráfego no mesmo local da área, sendo este um fator contribuinte da degradação da estrutura do solo.

Desse modo, objetivou-se elaborar modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) para um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros e avaliar o impacto das atividades de manejos executadas com maquinário agrícola em diferentes camadas do solo, classes de declividade de terreno e tempo de manejo da lavoura cafeeira.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido em lavouras cafeeiras comerciais pertencentes à Fazenda Pinheiros, localizada no município de Campos Gerais-MG (Figura 1). O clima é classificado segundo como Cwa, com temperatura média anual de 19,5°C e precipitação média de 1.450 mm ano<sup>-1</sup>, segundo Alvarez et al. (2013). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho (Santos et al., 2013), sendo cultivado com cafeeiros das variedades Catuai e Acaia, irrigados por gotejamento. Para a elaboração dos modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) do solo e avaliação dos impactos do maquinário usado na lavoura, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em diferentes situações considerando a declividade do terreno, a profundidade da camada a ser avaliada, idade de manejo da lavoura e a posição de amostragem.

Figura 1 - Localização da fazenda no município de Campos Gerais e detalhes das áreas amostradas.



Legenda: M11: manejo com 11 anos; M13: manejo com 13 anos; M15: manejo com 15 anos.  
Fonte: Do Autor (2018).

As áreas da lavoura coletadas foram divididas em glebas diferentes, em função da mesma classe de solo e sob o mesmo manejo empregado, sendo estas áreas com três idades diferente, identificadas como M11, M13 e M15 com 11, 13 e 15 anos de manejo respectivamente. Em cada idade de manejo, a coleta de amostras ocorreu em diferentes classes de declividade, considerando-se as condições de relevo plano (0 a 3% de declividade), suave-ondulado (3 a 8% de declividade) e de ondulado (declividade de 8 até o máximo observado de 16%), identificadas como declividades I, II e III respectivamente. As amostras foram coletadas em diferentes locais da lavoura: no centro da entrelinha (EL) e no local de tráfego do rodado do maquinário. As amostras da EL foram destinadas à elaboração dos MCSC, por representar uma condição com menor influência direta do tráfego do maquinário, assim como os MCSC obtidos a partir delas, enquanto as amostras coletadas no rodado foram usadas para avaliação dos impactos do manejo na lavoura, as quais refletem o efeito do tráfego das máquinas agrícolas. Em função da declividade do terreno, as amostras coletadas no local do rodado foram obtidas no rodado de baixo (RB) e rodado de cima (RC), conforme a posição em relação à vertente (se a jusante ou a montante, respectivamente). Em cada ponto amostral foram coletadas amostras nas camadas de 0 a 3 cm, de 10 a 13 cm e de 25 a 28 cm.

As amostradas indeformadas foram coletadas com um amostrador do tipo Uhland com auxílio de cilindros metálicos, os quais possuem aproximadamente as medidas de 2,5 cm de altura x 6,5 cm de diâmetro. Para a elaboração dos Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC) coletou-se nas entrelinhas sete amostras indeformadas em cada declividade, camada e idade, totalizando 189 amostras (3 declividades x 3 camadas x 3 idades x 7 repetições). Para avaliação dos impactos das operações mecanizadas sobre a estrutura do solo, foram coletadas 21 amostras em cada condição de idade, declividade, camada e rodado, totalizando em 1.134 amostras (3 declividades x 3 camadas x 3 idades x 2 rodados x 21 repetições).

Após a coleta, as amostras foram envoltas em filme plástico, parafinadas e conduzidas ao laboratório para análises. No laboratório, as amostras foram preparadas, retirando o excesso de solo, de maneira que o volume do solo a ser avaliado correspondesse ao volume do cilindro. As amostras foram então pesadas, saturadas, e secas naturalmente ao ar até atingir umidades desejadas entre 0,05 a 0,5  $m^3 m^{-3}$ ,



controlando-a em função do peso da amostra. A seguir, as amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (DIAS JUNIOR e MARTINS, 2017) usando consolidômetros eletrônicos com ar comprimido (modelo S-450, Durham GeoSlope).

Com o excesso de solo retirado dos cilindros contendo as amostras foram feitas análises de textura pelo método da pipeta e análises de densidade de partículas pelo método do picnômetro (DONAGEMMA et al., 2017), e de matéria orgânica pela oxidação com  $K_2Cr_2O_7$  (FONTANA e CAMPOS, 2017), cujos resultados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Análises granulométricas, densidade de partículas (Dp) e de matéria orgânica do Solo (MOS).

Idades	Camadas	MOS (%)	Dp ( $g\ cm^{-3}$ )	Argila ( $g\ kg^{-1}$ )	Silte ( $g\ kg^{-1}$ )	Areia ( $g\ kg^{-1}$ )	Classe Textural
M11	0 - 3	3,63	2,68	460	337	204	Argiloso
	10 - 13	2,41	2,68	537	273	190	Argiloso
	25 - 28	2,24	2,68	543	261	197	Argiloso
M13	0 - 3	3,62	2,68	441	383	177	Argiloso
	10 - 13	2,48	2,68	543	333	124	Argiloso
	25 - 28	2,20	2,68	575	310	115	Argiloso
M15	0 - 3	3,52	2,68	447	390	164	Argiloso
	10 - 13	2,28	2,68	576	321	104	Argiloso
	25 - 28	2,14	2,68	649	254	97	Muito Argiloso

Legenda: M11: manejo 11 anos; M13: manejo 13 anos; M15: manejo 15 anos.

Fonte: Do autor (2018).

As amostras coletadas para a avaliação dos impactos do manejo na estrutura dos solos cultivados com cafeeiros passaram pelo mesmo procedimento de preparo, exceto pelo processo de saturação e controle de umidade, sendo estas amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial com a umidade natural de campo. Durante o ensaio de compressão uniaxial, foram aplicadas pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa até a amostra apresentar 90% da sua deformação máxima (TAYLOR, 1948). Todas as amostras após o ensaio de compressão uniaxial foram secas em estufa a 105-110°C por 48 horas até obter massa constante para determinação da massa de solo seco e, conseqüentemente, a densidade e a umidade do solo (DIAS JUNIOR e MARTINS, 2017).

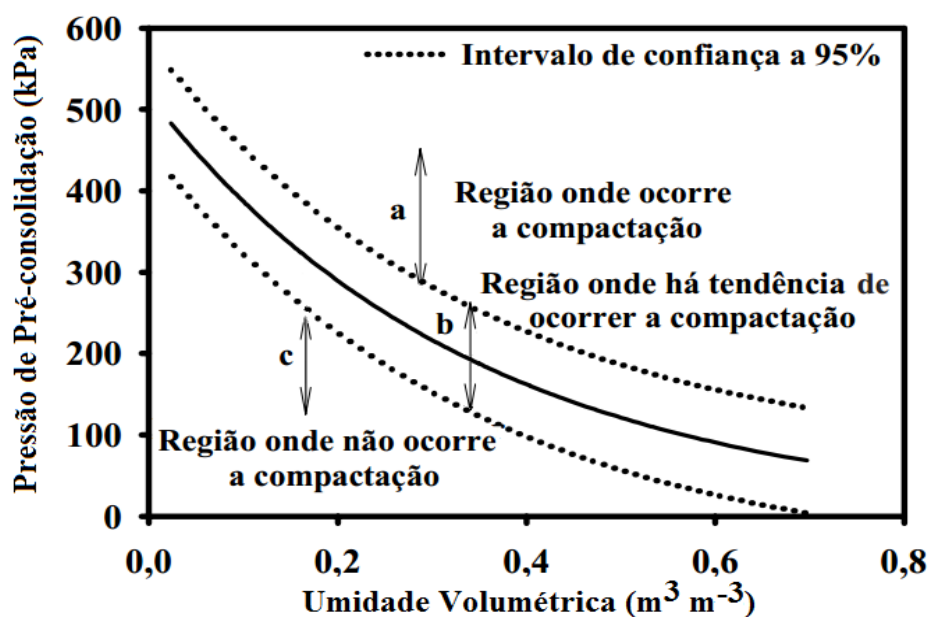
Com os resultados obtidos no ensaio de compressão uniaxial foram obtidas as curvas de compressão do solo e a pressão de pré-consolidação ( $\sigma_p$ ) de acordo com Dias Junior e Pierce (1996). Os modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC) foram

obtidos através da representação dos valores de  $\sigma_p$  em função da umidade volumétrica ( $\Theta$ ) e ajustados conforme o modelo  $\sigma_p = 10^{(a+b\Theta)}$ , descrito por Dias Junior (2007) e comparados entre si, usando o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989). Também foi utilizado o software Sigma Plot 12.5 para a elaboração dos gráficos.

A comparação entre os MCSC primeiramente foi realizada para as classes de declividade do terreno, em seguida para as camadas avaliadas e posteriormente para as idades de manejo da lavoura cafeeira. Os modelos que não apresentaram diferença estatística, os valores de  $\sigma_p$  e  $\Theta$  foram agrupados e uma nova equação foi ajustada, resultando em um único modelo e representando as duas condições.

Os modelos representados graficamente foram divididos em três regiões diferentes (Figura 2) sendo a região: a = região onde ocorre a compactação do solo, sendo a pressão aplicada superior à pressão de pré-consolidação promovendo compactação adicional do solo; b = região onde não ocorre compactação do solo, mas tende a sofrer compactação nas próximas operações se as pressões aplicadas forem superiores do que as pressões do limite superior do intervalo de confiança; c = região onde não ocorre compactação do solo, sendo a pressão aplicada inferior à máxima pressão que o solo sofreu no passado e expressa a faixa ideal de aplicação de pressões para manejo do solo.

Figura 2 - Critérios utilizados para avaliar os impactos das operações mecanizadas sobre a estrutura do Latossolo Vermelho.



Legenda: a = região onde já ocorreu compactação do solo; b = região onde não ocorre compactação do solo, mas tende a sofrer compactação nas próximas operações se as pressões

aplicadas forem superiores do que as pressões do limite superior do intervalo de confiança; c = região onde não ocorre compactação do solo.

Fonte: Dias Junior et al. (2007).

A quantificação dos impactos foi feita representando nos MCSC as  $\Theta$  x  $\sigma_p$  determinadas para o RB e o RC, e calculando o percentual das amostras nas regiões “a”, “b” e “c” da figura 2. Dessa forma, num total de 20 amostras avaliadas em cada condição, se 10 amostras estiverem compactadas, significa 50% de amostras compactadas.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Modelos de capacidade de suporte de carga (MCSC)**

Inicialmente comparou-se os MCSC das classes de declividade I e II em cada camada e idade de manejo, não sendo observadas diferenças significativas nem no intercepto e nem no coeficiente angular para nenhuma das condições avaliadas (Tabela 2). Assim, os dados dessas duas classes de declividade foram agrupados em um único modelo, que foi então comparado à declividade III em cada camada e idade de manejo. Não sendo observadas diferenças significativas no intercepto e nem no coeficiente angular (Tabela 2), os valores de  $\sigma_p$  e  $\Theta$  de todas as declividades foram então agrupados em um único modelo de capacidade de suporte de carga. Isso significa que as classes de declividade não influenciaram nos MCSC para essas condições, apresentando a mesma capacidade de suportar carga, podendo ser um indicativo que o tempo de manejo sobrepuja os efeitos da declividade. Avaliando lavouras cafeeiras em diferentes condições de declividade, Iori et al. (2014b) observaram efeito da declividade na capacidade de suporte de carga do solo apenas na estação seca, sendo que a declividade de 15% apresentou maior pressão de pré-consolidação. Esse tempo de manejo da lavoura cafeeira, também pode estar associado ao acúmulo de carbono orgânico do solo na entrelinha (COGO et al., 2013) conferindo maiores teores de matéria orgânica na superfície, como demonstrado. Maiores teores de matéria orgânica contribuem para melhorar a estruturação do solo e a porosidade, podendo tornar o solo mais suscetível à degradação pelo manejo inadequado.

Tabela 2 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga para as diferentes declividades em cada camada e idade de manejo, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Idade	Camada	Comparação das declividades			Homogeneidade	Intercepto (a)	Coefficiente Angular (b)
M11	0 a 3 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
	10 a 13 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
	25 a 28 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
M13	0 a 3 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
	10 a 13 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
	25 a 28 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
M15	0 a 3 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
	10 a 13 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns
	25 a 28 cm	I	x	II	H	ns	ns
		I e II	x	III	H	ns	ns

Legenda: H: homogêneo; NH: não homogêneo; \*: significativo a 5%; \*\*: significativo a 1%.

Após a comparação dos MCSC das classes de declividade, estes foram comparados para as camadas em cada idade (Tabela 3). Nas idades M11 e M13, comparando-se as camadas de 0 a 3 e 10 a 13 cm, não houve diferença significativa, sendo os valores de  $\sigma_p$  e  $\Theta$  agrupados em um único modelo para cada idade. Esses modelos foram então comparados com o da camada de 25 a 28 cm, sendo observado diferença significativa em ambas as idades. Dessa forma, para as idades M11 e M13, a capacidade de suporte de carga do solo é representada por dois modelos, um para as camadas mais superficiais, de 0 a 3 e 10 a 13 cm (M11sup e M13sup, respectivamente), e outro para a camada mais profunda, de 25 a 28 cm (M11prof e M13prof respectivamente). Já a idade M15 não apresentou diferença estatística entre as diferentes camadas e os valores de  $\sigma_p$  e  $\Theta$  de todas as camadas foram agrupados em um único MCSC (M15 total).

Tabela 3 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga entre as camadas para as diferentes idades de manejo, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Idade	Comparação das camadas		Homogeneidade	Intercepto (a)	Coeficiente Angular (b)
M11	0 a 3 cm	x 10 a 13 cm	H	ns	ns
	0a3 e 10a13 cm	x 25 a 28 cm	NH	**	ns
M13	0 a 3 cm	x 10 a 13 cm	H	ns	ns
	0a3 e 10a13 cm	x 25 a 28 cm	H	**	*
M15	0 a 3 cm	x 10 a 13 cm	H	ns	ns
	0a3 e 10a13 cm	x 25 a 28 cm	H	ns	ns

Legenda: H: homogêneo; NH: não homogêneo; \*: significativo a 5%; \*\*: significativo a 1%.  
Fonte: Do autor (2019).

Na comparação dos MCSC entre idades (Tabela 4), não foi observada diferença significativa entre os MCSC das idades M11 e M13 nas camadas mais superficiais (M11sup e M13sup), sendo essas duas idades agrupadas em um apenas um modelo (M11 + M13 sup). Já a comparação dos MCSC entre as idades M11prof e M13prof na camada 25 a 28 cm indicou diferença significativa. Todas as demais comparações de idade indicaram diferenças significativas entre os MCSC testados. Assim, a comparação entre os MCSC indicaram a existência de quatro modelos para representar a capacidade de suporte de carga do LV das lavouras cafeeiras avaliadas, sendo: um modelo para a camada superficial das idades M11 e M13, um único modelo para todas as camadas de M15, e um modelo para cada uma das idades M11 e M13 na camada 25 a 28 cm (denominados respectivamente de M11 + M13 sup, M15, M11 prof e M13 prof).

Tabela 4 - Comparação dos modelos de capacidade de suporte de carga em cada camada para as diferentes idades de manejo, de acordo com o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989).

Comparação das idades		Homogeneidade	Intercepto (a)	Coeficiente Angular (b)
M11 sup	x M13 sup	H	ns	ns
M11 prof	x M13 prof	H	*	*
M11 prof	x M15	H	*	ns
M13 prof	x M15	H	**	**
M11 + M13 sup	x M15	H	**	**

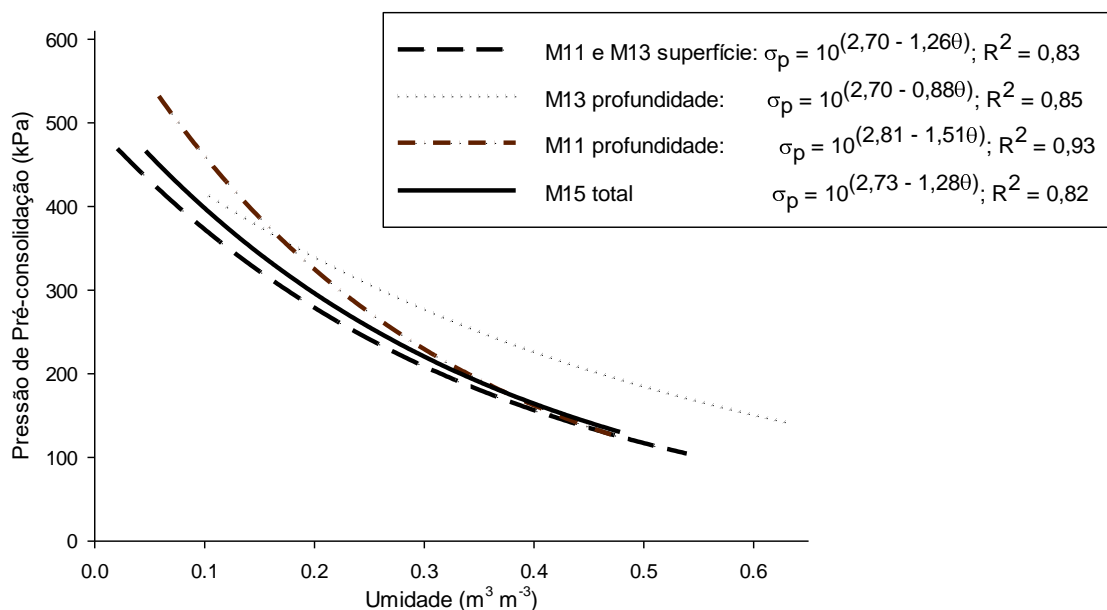
Legenda: H: homogêneo; NH: não homogêneo; ns: não significativo; \*: significativo a 5%; \*\*: significativo a 1%; M11 sup.: manejo 11 anos na camada superficial; M11 prof.: manejo 11 anos em profundidade; M13 sup.: manejo 13 anos na camada superficial; M13 prof.: manejo 13 anos em profundidade; M15: manejo 15 anos.

Fonte: Do autor (2019)

A camada de 25 a 28 cm da idade M11 e M13 apresentaram maior capacidade de suporte de carga (Figura 3) e a idade M11 agrupada com a idade M13 na camada superficial foi a mais suscetível à compactação. Essa maior capacidade de suportar carga na camada de 25 a 28 cm pode estar relacionada ao histórico de manejo da área, onde a modelo de capacidade de suporte de carga representa a máxima pressão sofrida por essa camada anteriormente, além de expressar a pressão máxima que esse solo suporta para que não ocorra degradação da sua estrutura. O mesmo raciocínio pode ser aplicado para a idade M11 agrupada com a idade M13 na camada superficial que foi a mais suscetível à compactação, indicando que essa camada sofreu menor pressão aplicada no seu histórico de manejo em comparação com as demais camadas avaliadas. À medida que a umidade do solo aumenta, a idade M13 em profundidade apresentou maior capacidade de suporte de carga em relação às demais camadas e idades avaliadas, ficando mais evidente a partir de 20 % de umidade.

Com vários anos subsequentes de manejo é possível que a organização estrutural do solo seja alterada ao longo do perfil, de maneira que a camada superficial passa a ter o mesmo comportamento da camada em profundidade. Isso foi observado na ausência de diferenças estatísticas entre as camadas avaliadas da lavoura com 15 anos de manejo (M15), sendo o tempo de manejo e o histórico de pressões aplicadas no passado a causa da mesma capacidade de suporte de carga dessas camadas.

Figura 3 - Modelos de Capacidade de Suporte de Carga (MCSC) nas diferentes camadas e idades de manejo da lavoura.



Fonte: Do autor (2019).

### 3.2 Avaliação do impacto nos rodados

A porcentagem de amostras compactadas variou de 40% a 85%, indicando que o manejo adotado na lavoura cafeeira ao longo dos anos vem degradando a estrutura do solo (Tabela 5). De acordo com os modelos de capacidade de suporte de carga apresentados na figura 3, um maior percentual de amostras compactadas foi comumente mais encontrado na camada de 0 a 3 cm, indicando que a essa camada foi em geral a mais degradada pelo maquinário usado no manejo da lavoura cafeeira.

Observando o manejo de treze anos na camada de 0 a 3 cm foi encontrado o maior percentual de amostras compactadas na classe de declividade três, sendo essa mesma classe com o menor percentual de amostras compactadas na camada de 25 a 28 cm. No manejo de quinze anos, a classe de declividade I na camada de 0 a 3 cm foi a que apresentou maior percentual de amostras compactadas.

No manejo de treze e de quinze anos, todas as condições avaliadas apresentaram mais de 50% das amostras compactadas, indicando que o manejo vem promovendo compactação do solo em profundidade, atingindo até a camada de 25 a 28 cm em todas as classes de declividade. No manejo de onze anos, somente as camadas de 0 a 3 cm e de 10 a 13 cm apresentaram percentual de amostras compactadas igual ou

superior a 50%. Isso indica que o manejo adotado na lavoura ao longo dos anos vem degradando a estrutura do solo nas camadas mais inferiores.

Tabela 5 - Porcentagem de amostras compactadas em função da idade de manejo (M11, M13 e M15), camada amostrada (0-3, 10-13 e 25-28 cm), declividade (classes I, II e III) e posição de amostragem (RB e RC).

Porcentagem de amostras compactadas (%)									
Rodado	Camada de 0 a 3 cm			Camada de 10 a 13 cm			Camada de 25 a 28 cm		
	M11	M13	M15	M11	M13	M15	M11	M13	M15
Classe de declividade I - De 0 a 3%									
RB	70	63	58	50	70	70	55	55	70
RC	50	72	85	50	70	80	45	72	70
Classe de declividade II - De 3 a 8%									
RB	60	80	70	55	63	55	40	58	75
RC	68	68	53	55	72	60	65	74	75
Classe de declividade III - De 8 a 16%									
RB	70	84	45	65	58	80	50	53	75
RC	75	79	60	50	79	79	40	56	68

Fonte: Do autor (2018).

Nas camadas de 10-13 cm e de 25-28 cm, a idade M15 apresentou maior porcentagem de amostras compactadas, sendo que esta idade também apresentou menor capacidade de suporte de carga em relação à camada de 25-28 cm das idades M11 e M13. Isso pode ser em decorrência do manejo empregado ao longo dos quinze anos, em que o impacto tenha atingido camadas mais profundas no perfil do solo, chegando até a camada de 25 a 28 cm. Quando observamos a camada de 25 a 28 cm em relação às demais camadas avaliadas, esta foi a que apresentou maior percentual de amostras compactadas. Isso indica que os anos sequenciais desse manejo na lavoura tendem a degradar a estrutura do solo em camadas mais profundas do perfil. Para evitar que o manejo venha a degradar a estrutura nessa camada do perfil do solo, uma das alternativas seria reduzir a carga aplicada na superfície do solo.

Quando se compara o rodado de cima (RC) e o rodado de baixo (RB) em seus percentuais de amostras compactadas, observa-se que os valores são frequentemente próximos entre si, independentemente da classe de declividade e das camadas avaliadas (Tabela 5). Essa ausência de diferença pode estar associada ao tempo de manejo da lavoura cafeeira, onde a deformação estrutural do solo atingiu o mesmo nível de degradação tanto no RB quanto no RC. Em lavouras cafeeiras mais novas, com menor tempo de tráfego de máquinas e, conseqüentemente menor número de passadas no



mesmo local, essa diferença entre o RB e o RC, poderá ser mais evidenciada, com diferenças entre os dois rodados.

Esses resultados diferentes encontrados por Martins et al. (2012) durante a avaliação de um Latossolo Vermelho-Amarelo, os quais observaram maiores percentuais de amostras compactadas no rodado de baixo em comparação com o rodado de cima. As classes de declividade apresentaram pequenas diferenças entre si, tanto na média (Tabela 5) quanto na amplitude de variação (Figura 3), indicando que a declividade não foi o fator responsável pela ocorrência de compactação do solo nas condições avaliadas. O efeito da declividade também não foi observado por Iori et al. (2014b), para porosidade total, macroporosidade e densidade do solo, sendo o aumento da densidade do solo inferida sobre a possível compactação do solo.

A compactação do solo em camada subsuperficial no solo pode resultar em menor crescimento do sistema radicular, seguido por menor absorção de água e nutrientes, resultado em queda de produtividade da lavoura em safras posteriores.

#### **4 CONCLUSÕES**

Em função do longo tempo de manejo a declividade do terreno não influenciou os Modelos de Capacidade de Suporte de Carga.

Nas lavouras com 11 e 13 anos, a camada de 25-28 cm apresentou maior capacidade de suporte de carga que as camadas mais superficiais (0-3 e 10-13 cm), enquanto a idade M15 apresentou mesma capacidade de suporte de carga para todas as camadas avaliadas.

A posição de amostragem em geral resultou em percentuais de amostras compactadas similares entre os rodados de cima e de baixo.

A incidência de amostra compactadas foi bastante frequente na camada de 0 a 3 cm, enquanto o aumento da idade de manejo favoreceu a ocorrência de amostras compactadas nas camadas mais profundas.

## REFERÊNCIAS

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**, Lavras, MG; v. 41, n. 2, p. 191-200, 2017. doi: 10.1590/1413-70542017412036216.

COGO, F. D.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; ZINN, Y. L.; DIAS JUNIOR, M. S.; ALCÂNTARA, E. N.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoques de carbono orgânico do solo em cafezais sob diferentes sistemas de controle de plantas invasoras. (In Portuguese, with English abstract). **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, PR; v. 34, p. 1089-1098, 2013.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**; v. 5, n. 4, Quarto levantamento, p. 1-84, Brasília, DF, dezembro 2018.

DIAS JUNIOR, M. S.; FOSENCA, S. da; ARAUJO JUNIOR, C.; F.; SILVA, A. R. Soil compaction due to forest harvest operations. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF; v. 42, n. 2, p. 257-264, fev. 2007.

DIAS JUNIOR, M. S.; MARTINS, P. C. C. Ensaio de compressão uniaxial e modelos de capacidade de suporte de carga do solo. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. p.152-171, 2017.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: o processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-192, jun. 1996.

DONAGEMMA, G. K.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. Densidade de Partículas. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos. p.76-81, 2017.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Q. J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-28.

FONTANA, A.; CAMPOS, D. V. B. Carbono orgânico. In: **Manual de métodos de análise de solo** (ed. Teixeira, P. C. et al.). Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos; p. 360-367, 2017.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT: Production**. Rome: FAO Statistics Division, 2019a. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> >. Acesso em: 15 mar. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **FAOSTAT: Crops and livestock products**. Rome: FAO Statistics Division,

2019b. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/TP>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

HOLTHUSENA, D.; BRANDTB, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest-grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, NL; v. 177, p. 113-124, 2018. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.003

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; SOUZA, Z. R.; FIGUEIREDO, V. C. Seasonal change of soil precompression stress in coffee plantation under sub-humid tropical condition. **Coffee Science**. Lavras, MG; v. 9, p. 145-154, 2014a.

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. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG; v. 37, p. 130-137, 2013.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; ABREU JÚNIOR, A. A. Influence of field slope and coffee plantation age on the physical properties of a Red-Yellow Latosol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG; v. 38, n. 1, p. 107-117, 2014b.

MARTÍN, M. A.; MARTÍNEZ, F. S. J.; PERFECT, E.; LADO, M.; PACHEPSKY, Y. Soil structure and function in a changing world: Characterization and scaling. **Geoderma**, Amsterdam, NL; v. 287, n. 1 February, p. 1-3, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.08.015>.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; ANDRADE, M. L. C.; GUIMARÃES, P. T. G. Compaction caused by mechanized operations in a Red-Yellow Latosol cultivated with coffee over time. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, MG; v. 36, p. 391-398, 2012

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; TAKAHASHI, E. N.; TASSINARI, D. Soil compaction during harvest operations in five tropical soils with different textures under eucalyptus forests. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG; v. 42, 58 - 68, 2018. doi:10.1590/1413-70542018421005217

MESQUITA, C. M.; REZENDE, J. E.; CARVALHO, J. S.; FABRI JUNIOR, M. A.; MORAES, N. C.; DIAS, P. T.; CARVALHO, R. M.; ARAUJO, W. G. **Manual do café: manejo de cafezais em produção**. Belo Horizonte: EMATER-MG, 72p. il., 2016.

MUELLER, L.; SCHINDLER, U.; MIRSCHEL, W.; SHEPHERD, T. G.; BALL, B. C.; HELMING, K.; ROGASIK, J.; EULENSTEIN, F.; WIGGERING, H. (2010) Assessing the productivity function of soils. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, FR; v. 30, p. 601-614, set. 2010. DOI: 10.1051/agro/2009057.

NUNES, H. B.; KATO, E.; SÁ, M. A. C.; ROSA, V. A.; CARVALHO, A. S.; SOARES NETO, J. P. Influência da temperatura sobre a agregação do solo avaliada por dois métodos. **Ciência Florestal**., Santa Maria, RS; v. 29, n. 2, p. 496-507, abr./jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509830949>.

PAIS, P. S. M.; DIAS JUNIOR, 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. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG; v. 37, p. 145-151, 2013.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLUTER, S.; VOGEL, H. -J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**. Amsterdam, NL; v. 314, p. 122-137, 2018. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.11.009.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. 2013. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 3ª ed. rev. ampl. Brasília, DF. 353p. Embrapa, 2013.

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

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. S.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB; v.17, n. 12, p. 1301-309, 2013.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Wiley and Sons, 1948.

**Artigo 3****PRESSÕES DINÂMICAS DOS EQUIPAMENTOS DE MANEJO NA  
LAVOURA CAFEIEIRA ATRAVÉS DO PRESSURÔMETRO****DYNAMIC PRESSURES OF FARM MACHINERY IN COFFEE  
PLANTATION ASSESSED WITH A PRESSUROMETER****RESUMO**

No manejo da lavoura cafeeira são empregados máquinas e equipamentos que auxiliam nas atividades de manejo, as quais aplicam pressões na superfície do solo em diferentes condições de terreno. Essas, são pressões dinâmicas aplicadas na superfície do solo durante o manejo da lavoura que, varia de acordo com o peso e o tipo de cada equipamento. Diante do exposto, objetivou-se identificar qual equipamento empregado no manejo da lavoura cafeeira aplica maior pressão dinâmica sobre a superfície do solo. As pressões dinâmicas de alguns tratores, colhedoras cafeeiras e máquinas usadas no manejo da lavoura cafeeira foram medidas com um “Pressurômetro” em uma propriedade rural. Entre as máquinas, a colhedora K3500 e o equipamento transbordo K3 foram os equipamentos que aplicaram a maior pressão dinâmica na superfície do solo.

Palavras-chaves: Pressões dinâmicas. Colhedora de café. Compactação do solo. Estrutura do solo.

## ABSTRACT

The management of coffee plantations makes use of machinery and equipment that apply pressures upon the soil surface under different terrain conditions. These dynamic pressures are applied to the soil surface during the crop management and vary according to the weight and type of equipment. The aim of the present study was to identify which of the equipment used in the management of coffee plantations applies the highest pressure on the soil surface. The dynamic pressures of different tractors, harvesters and other equipment were measured with a pressurometer on a coffee plantation farm. Among the machinery, the harvester K3500 and the transporter K3 applied the highest dynamic pressures on the soil surface.

**Keywords:** Dynamic pressures. Coffee harvester. Soil compaction. Soil structure.

## 1 INTRODUÇÃO

A produtividade de uma determinada área está relacionada com as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e com o manejo adotado. Nas propriedades rurais, em sua grande maioria, dependendo da sua extensão territorial, são empregados máquinas e equipamentos que auxiliam no manejo da lavoura cafeeira tornando os custos de produção menores devido ao maior rendimento operacional. Essas máquinas trafegam em velocidades diferentes podendo aplicar ao solo pressões dinâmicas diferentes das mencionadas nos manuais dos fabricantes, que são as pressões estáticas dos equipamentos.

O uso de máquinas e equipamentos agrícolas quando empregadas sem critérios, podem promover degradação da estrutura física do solo devido à pressão exercida na superfície do solo e conseqüentemente redução do potencial produtivo, comprometendo a sustentabilidade do sistema. Considerando que as pressões constantes nos manuais das máquinas e equipamentos são determinadas com as máquinas paradas e em locais planos, identificadas como pressão estáticas e que, no campo as máquinas estão em movimento e muitas vezes operando em diferentes declividades, podem aplicar pressões maiores que as encontrada nos manuais dos fabricantes e com maior potencial para degradar a estrutura do solo, o que indica a importância em medir e conhecer as pressões dinâmicas.

Entre os processos de degradação da estrutura do solo, a compactação vem se destacando principalmente pela falta de critérios no manejo que atentem para a conservação da estrutura do solo, evitando a deterioração de seu sistema poroso, de sua capacidade de realizar trocas gasosas, armazenamento e redistribuição de água no perfil do solo. Além disso, o crescimento do sistema radicular pode ser comprometido, prejudicando o desenvolvimento da planta e a sua produção.

A compactação do solo está associada à aplicação de cargas na superfície do solo superiores à capacidade de suporte de carga do solo. Este processo altera a estrutura do solo e prejudica o desempenho adequado de suas funções físicas. A capacidade do solo em suportar carga varia com as classes de solo que possuem estruturas diferentes, e principalmente, com a umidade do solo. Dessa forma, no período chuvoso, o solo apresenta menor capacidade de suporte de carga e, no período seco, este apresenta maior capacidade de suportar cargas sendo a época mais favorável ao tráfego de máquinas nas áreas produtivas. Segundo Souza et al. (2014) é necessário empregar

práticas que reduzam a degradação da estrutura do solo, atenuando os efeitos da compactação.

A aplicação de pressões dinâmicas no solo oriundo do tráfego de máquinas agrícolas varia em função das características de cada equipamento e do manejo adotado na condução da lavoura cafeeira. Associado a essas pressões dinâmicas aplicadas por cada equipamento, a intensidade de tráfego principalmente em condições inadequadas de umidade do solo, podem contribuir de forma significativa para a degradação da estrutura do solo.

Desse modo, as pressões dinâmicas aplicadas por um mesmo equipamento podem ser diferentes, em função de vários fatores como a área de contato do rodado da máquina, pressão de inflação dos pneus, declividade da área, posição da roda traseira ou dianteira da máquina, posição do rodado da máquina no terreno, velocidade de deslocamento e características das máquinas como o peso da máquina agrícola e dos equipamentos.

Áreas que apresentam topografia declivosa, o centro de gravidade da máquina tende a aproximar da roda que trafega em cota mais baixa (roda de baixo), podendo aplicar maior pressão dinâmica em comparação com a roda de cota mais elevada (roda de cima) promovendo maior degradação da estrutura do solo. Essa degradação pode ocorrer no rodado de baixo e rodado de cima, como encontrado por Iori et. al., (2014), onde os autores verificaram degradação na estrutura nos dois rodados.

O maior desafio nos solos agrícolas é o seu manejo, usando toda a tecnologia disponível em máquinas e equipamentos sem degradar sua estrutura, evitando assim a compactação do solo. Segundo Alaoui e Diserens (2018) o risco da compactação nas áreas agrícolas é dependente da máquina empregada no manejo e das propriedades do solo. Após a passagem do equipamento o solo sofre as consequências da pressão dinâmica aplicada, a qual poderá ser maior do que a pressão estática do mesmo, vindo a contribuir para uma degradação mais severa no solo.

Diante destas considerações, o objetivo deste estudo foi medir as pressões dinâmicas aplicadas pelo maquinário utilizado no manejo da lavoura cafeeira e determinar a operação de manejo com maior potencial de degradação da estrutura do solo em diferentes declividades de terreno.



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Para as medições das pressões dinâmicas foi empregado o equipamento denominado de pressurômetro (Figura 1). Este equipamento foi desenvolvido por Araújo Junior et al. (2009), e consiste em uma mangueira de alta resistência vedada por um tampão em uma extremidade e acoplada a um manômetro na outra. A deformação resultante da passagem do rodado da máquina agrícola sobre a mangueira pressuriza o fluido hidráulico no seu interior, o que é registrado pelo manômetro (Modelo 650.01, Marca IOPE Instrumentos de Precisão). O manômetro com calibração de fábrica, registra leituras de 0 a 30,0 bar, que corresponde de 0 a 2940 kPa, e foi zerado antes de todas as medições.

Figura 1 - Manômetro de pressão acoplado à mangueira (pressurômetro).



Legenda: Detalhes da leitura no pressurômetro.

Fonte: Do autor (2019).

A mangueira, com aproximadamente 2 metros de comprimento, foi estendida sobre o solo, retirando a serrapilheira do local, de maneira que o pneu do equipamento passasse sobre ela, promovendo sua deformação, e, com isso, gerando uma pressão no fluido interno à mangueira, a qual foi registrada no manômetro. Observou-se que quando o solo se encontrava úmido, a deformação que deveria ocorrer na mangueira ocorria no solo pois ele apresentava baixa resistência e, conseqüentemente, a mangueira afundava no solo e a pressão dinâmica aplicada não era registrada. Para evitar isso, optou-se por colocar um anteparo rígido (tábua de madeira) para que a deformação ocorresse na mangueira. Para verificar o efeito do anteparo, foram realizadas leituras nas condições com e sem o anteparo (Figura 2). As leituras foram realizadas em três diferentes condições de declividade (0 a 3%, 3 a 8% e 8 a 16%), sendo tomadas cinco leituras de pressão dinâmica em cada condição avaliada.

Figura 2 - Condição do anteparo rígido e sem o anteparo.



Fonte: Do autor (2019).

Para calcular a área de contato do pneu com o solo foi usado um barbante, medido o perímetro, o comprimento e a largura da área de contato (Figura 3). Essa área de contato apresentou o formato de uma elipse, que foi calculada pela fórmula:  $A = \pi R r$ , onde  $A$  = área,  $R$  = raio maior,  $r$  = raio menor,  $\pi = 3,141593$ . Os valores dos raios foram determinados pelas medidas da largura e comprimento da área de contato do pneu com o solo, sendo a metade da largura o raio menor ( $r$ ) e a metade do comprimento o raio maior ( $R$ ). Essas informações da área de contato dos pneus são apresentadas no manual do fabricante, mas podem apresentar dimensões diferentes em função da calibração do pneu.

Figura 3 - Detalhes da medição da largura do rodado dos pneus dos equipamentos



Fonte: Do autor (2018).

Foram medidas as pressões dinâmicas nos rodados dianteiro e traseiro das colhedoras VN 3 rodas, TDI 3 Rodas, Mini TDI 3 Rodas, Case 3 rodas e Jacto K3500 4 Rodas. As colhedoras com três rodas apresentam uma roda apenas do lado direito e duas rodas do lado esquerdo no sentido do deslocamento. Todas estas colhedoras são automotriz, ou seja, não é necessário um trator para reboque e trafegam em velocidades diferentes devido a regulagem operacional estabelecidas pela administração do proprietário. Cada colhedora possui uma massa que influencia nas pressões dinâmicas durante a operação de colheita (Tabela 1). Essas colhedoras são máquinas usadas todos os anos durante a colheita da lavoura cafeeira, sendo suas características apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 - Colhedoras de café usadas na coleta de dados na mesma classe de solo.

Colhedoras	Massa (Kg)	*Reserv. (litros)	Massa (Kg)	Vel. (m/h)	**Pressão (libras)	Pneus
						Medidas
TDI	7780	3000	10780	1200	40	400/60-15.5 IMP
Mini TDI	6280	2000	8280	1000	50	400/60-15.5 IMP
Case 200 multi	6700	2000	8700	800	40	400/60-15.5 IMP
VN	4000	2100	6100	600	50	400/60-15.5 IMP
K3500	11700	3000	14700	600	45	500/45-22.5 IMP

Legenda: \*Reservatório de grãos para armazenamento na ausência do transbordo, \*\* Pressão de inflação dos pneus, Vel.: velocidade operacional da colhedora.

Também foram feitas leituras das pressões dinâmicas em alguns tratores que executam as atividades de manejo da lavoura cafeeira durante o ano e alguns dos seus equipamentos, como o trator Massey Ferguson 275 com carreta transbordo para transporte durante a colheita, tratores Valmet 685, 785 e BF 75, ambos 4 x 4 podendo ser acoplados na adubadora Miname e pulverizador Arbus 2000, trator Yanmar 1155.4 acoplado com adubadora Miname, trator Yanmar 1155.4 acoplado com pulverizador de 400 Litros em três pontos do sistema hidráulico e trator Yanmar 1175.4 acoplado com Pulverizador ARBUS 2000 com engate na barra de tração.

As características dos tratores e dos equipamentos usados são apresentadas na tabela 2. As medições das pressões dinâmicas aplicadas pelos tratores foram realizadas com os tratores trafegando na sua velocidade operacional de trabalho e com os pneus calibrados na pressão de inflação de acordo com as recomendações dos fabricantes. Nessa mesma tabela, os equipamentos que possuem roda única como o transbordo K3, a adubadora Miname e o pulverizador Arbus 2000 são os equipamentos de arrasto, que podem ser acoplados em qualquer trator durante as operações.

Tabela 2 - Tratores e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira. (Continua).

Equipamento	Massa (kg)	Capacidade de carga (kg)	Pneus			Medidas
			Lastro (kg)	Quantidade de água (L)	*Pressão (libras)	
Pneus Dianteiro						
Valmet 785	4410	0	150	0	40	**14.9-24
Valmet 685	1950	0	0	0	40	14.9-24
Valmet BF 75	3294	0	150	0	40	14.9-24
Yanmar 1155.4	2280	0	176	0	40	6.00-14
Yanmar 1175.4	3212	0	396	0	40	8.00-18
MF 275	3750	0	150	0	40	12.4-24
Pneus traseiro						
Valmet 785	4410	0	75	200	40	14.9-24
Valmet 685	1950	0	75	200	40	14.9-24
Valmet BF 75	3294	0	90	200	40	14.9-24
Yanmar 1155.4	2280	0	44	200	20	9.5-24
Yanmar 1175.4	3212	0	22	200	18	14.9-24
MF 275	3750	0	150	200	40	18.4-30

Tabela 2 - Tratores e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira. (Conclusão).

Equipamento	Massa (kg)	Capacidade de carga (kg)	Pneus			Medidas
			Lastro (kg)	Quantidade de água (L)	*Pressão (libras)	
Roda única do equipamento de manejo						
Transbordo K3	1000	2000	0	0	50	9.00-20 - 10L
Ad. Miname	650	1200	0	0	50	9.00-20 - 10L
Arbus 2000	1050	2000	0	0	45	11-L-15 - 12L

Legenda: \*Pressão de inflação dos pneus; \*\*14.9: Largura nominal da seção em pol/mm; 24: diâmetro nominal do aro em polegadas; 10L: Dez Lonas.

O transbordo K3 é uma carreta de duas rodas arrastada por um trator que acompanha a colhedora K3500 durante a colheita da lavoura cafeeira com capacidade de três toneladas (Figura 4A), sendo adotado durante a coleta de dados como roda dianteira e roda traseira, as rodas do trator e roda única, a roda da carreta. Esse mesmo procedimento também se aplica à adubadora Miname e ao pulverizador Arbus 2000, sendo roda única, a roda do equipamento e as rodas dianteira e traseira, as rodas do trator. O transbordo K3 e a adubadora Miname possuem o mesmo modelo de roda e pneu, tendo como características rodas e pneus estreitos. Já o pulverizador Arbus 2000 possui rodas e pneus específicos de rodagem (Figura 4B). O pulverizador de 400 L, é um pulverizador acoplado no engate de três pontos do trator (Figura 4C), sendo medido as pressões dinâmicas da rodagem do trator. No momento das medições das pressões dinâmicas, todos os equipamentos estavam cheios, na sua máxima capacidade de peso, conforme demonstrado na tabela 2.

Figura 4 - A:Trasbordo K3.; B: Pulverizador Arbus 2000; C: Pulverizador 400L.



Fonte: Do autor (2018).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores encontrados na condição com anteparo e sem anteparo foram estatisticamente diferentes (Tabela 3) para todos os equipamentos avaliados, exceto para colhedora Case na classe de declividade III. Possivelmente, a mangueira do pressurômetro colocada diretamente sobre o solo nessa condição, coincidiu com locais compactados ou com baixa umidade do solo, situação que aumenta a resistência mecânica do solo, tornando mais difícil sua deformação, permitindo que a pressão aplicada fosse registrada no manômetro.

As leituras das pressões dinâmicas realizadas com o anteparo rígido abaixo da mangueira do pressurômetro foram superiores àquelas efetuadas com a mangueira diretamente sobre o solo. Isso ocorre devido a pressão aplicada pelos equipamentos promover a deformação da mangueira sobre o anteparo, ao passo que sem o anteparo rígido, a deformação da mangueira é transferida para o solo não efetuando o registro no

manômetro de pressão. Esses resultados obtidos na condição com anteparo rígido, registrando maiores valores de pressões dinâmicas, indicam que as deformações ocorrem apenas na mangueira, ao passo que, na condição sem anteparo rígido, parte da pressão aplicada é transferida para o solo e outra parte se manifesta no manômetro, resultando em menores pressões aplicadas nessa condição.

A colocação da mangueira diretamente sobre o solo e no anteparo rígido, resulta em determinação de valores diferentes de pressões dinâmicas, apontando a necessidade de mais estudos visando aprimorar a metodologia, onde possivelmente, o anteparo rígido poderá apresentar maior eficiência.

Tabela 3 - Comparações das pressões dinâmicas aplicadas entre as condições com tábua e sem tábua, com leituras em kPa.

Equipamento	Com anteparo rígido	Sem anteparo rígido
Classe de Declividade I		
Colhedora K3500	2181 <sup>a</sup>	1012b
Classe de Declividade II		
Colhedora TDI	1791 <sup>a</sup>	944b
Colhedora Mini TDI	1909 <sup>a</sup>	1220b
Colhedora Case	1558 <sup>a</sup>	981b
Colhedora VN	1624 <sup>a</sup>	607b
Colhedora K3500	2125 <sup>a</sup>	977b
Adubadora Miname	427 <sup>a</sup>	118b
Classe de Declividade III		
Colhedora TDI	1649 <sup>a</sup>	1068b
Colhedora Mini TDI	1867 <sup>a</sup>	1165b
Colhedora Case	992 <sup>a</sup>	807a
Colhedora K3500	2247 <sup>a</sup>	1395b
Transbordo K3	806 <sup>a</sup>	571b

Legenda: Médias seguidas pelas mesmas letras na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-knott ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2018).

Na condição com anteparo rígido, quando se avaliou a classe de declividade I (Tabela 4), não houve diferença significativa entre a roda dianteira e a roda traseira da colhedora K3500, tanto para o rodado de baixo quanto para o rodado de cima. Também não houve diferença significativa entre os eixos dianteiro e os eixos traseiro na comparação do rodado de baixo com o rodado de cima. Nessa classe de declividade I, não foi usado as demais máquinas e equipamentos.

Tabela 4 - Pressões dinâmicas aplicadas em kPa pelas colhedoras e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira na condição com anteparo.

Equipamento	Com anteparo					
	Rodado de Baixo			Rodado de Cima		
	Dianteiro	Traseiro	Única	Dianteiro	Traseiro	Única
Classe de Declividade I						
Colhedora K3500	2190a $\alpha$	2238a $\alpha$	----	2088a $\alpha$	2208a $\alpha$	-----
Classe de Declividade II						
Colhedora TDI	2130Aa $\alpha$	1700Bb $\alpha$	1998Aa $\alpha$	1634Ca $\beta$	1480Aa $\alpha$	1802Aa $\alpha$
Colhedora Mini TDI	1972Aa $\alpha$	1842Ba $\alpha$	2094Aa $\alpha$	1954Ba $\alpha$	1662Aa $\alpha$	1926Aa $\alpha$
Colhedora Case	-----	-----	-----	1466Cb	1346Ab	1864Aa
Colhedora VN	1492Bb $\alpha$	1462Bb $\alpha$	1980Aa $\alpha$	1630Ca $\alpha$	1598Aa $\alpha$	1580Aa $\beta$
Colhedora K3500	2302Aa $\alpha$	2326Aa $\alpha$	-----	2380Aa $\alpha$	1494Ab $\beta$	-----
Aduadora Miname	136Cb $\alpha$	523Ca $\alpha$	663Ba $\alpha$	286Da $\alpha$	383Ba $\alpha$	573Ba $\alpha$
Pulverizador Arbus 2000	350Cb $\alpha$	346Cb $\alpha$	763Ba $\alpha$	570Da $\alpha$	683Ba $\alpha$	920Ba $\alpha$
Pulverizador 400L	220Ca $\alpha$	443Ca $\alpha$	-----	156Db $\alpha$	630Ba $\alpha$	-----
Classe de Declividade III						
Colhedora TDI	1750Ba $\alpha$	1128Bb $\alpha$	1806Aa $\alpha$	1868Aa $\alpha$	1308Cb $\alpha$	2032Aa $\alpha$
Colhedora Mini TDI	1704Ba $\alpha$	1972Aa $\alpha$	2016Aa $\alpha$	2036Aa $\alpha$	1632Ba $\alpha$	1844Aa $\alpha$
Colhedora Case	834Cb	680Bb	1462Ba	-----	-----	-----
Colhedora K3500	2354Aa $\alpha$	2168Aa $\alpha$	-----	2218Aa $\alpha$	2248Aa $\alpha$	-----
Transbordo K3	570Cb $\alpha$	666Bb $\alpha$	1250Ba $\alpha$	532Ba $\alpha$	788Ca $\alpha$	1032Ba $\alpha$

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada classe de declividade comparando os equipamentos; médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha em cada rodado e; médias seguidas pela mesma letra grega em cada roda comparando o rodado de baixo e o rodado de cima, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2018)

Comparando os equipamentos na linha (tabela 4), as pressões dinâmicas do rodado de baixo para a classe de declividade II (letras minúsculas), não houve diferença significativa de pressão dinâmica aplicada no rodado de baixo entre as rodas dianteira e traseira dos equipamentos colhedora VN e K3500, pulverizador Arbus 2000 e pulverizador de 400 L. A colhedora TDI aplicou mesma pressão dinâmica na roda dianteira e na roda única e, menor pressão dinâmica na roda traseira. Para a colhedora VN as rodas dianteira e traseira as pressões dinâmicas aplicadas não diferiram estatisticamente e, a roda única aplicou maior pressão dinâmica do que essas duas rodas. Já a colhedora Mini TDI, não houve diferença de pressão dinâmica aplicada entre as rodas.

O pulverizador Arbus 2000 aplicou maior pressão dinâmica no eixo da roda única e a adubadora Miname, a pressão dinâmica aplicada na roda traseira não diferiu da pressão dinâmica aplicada pela roda única, sendo que a roda dianteira aplicou a



menor pressão dinâmica aplicada. Esses resultados da adubadora Miname estão de acordo com o esperado devido serem equipamentos de arrasto por um trator, onde a pressão dinâmica está diretamente empregada na roda única e na roda traseira do trator.

Quando se observa o rodado de cima na classe de declividade II (Tabela 4), as pressões dinâmicas aplicadas pelas rodas dianteira e traseira não diferiram estatisticamente, exceto para a colhedora K3500 com maior pressão dinâmica na roda dianteira e para o pulverizador 400 L com maior pressão dinâmica na roda traseira. A roda única aplicou as mesmas pressões dinâmicas do que as outras rodas dos equipamentos, exceto para a colhedora Case, em que a maior pressão dinâmica foi aplicada pela roda única. Os resultados da adubadora Miname, do pulverizador Arbus 2000 e 400 L podem ser justificados devido ao fato do pulverizador 400 L ser um equipamento acoplado nos três pontos do hidráulico do trator e o pulverizador Arbus 2000 e a adubadora ser um equipamento de arrasto pela barra de tração do trator.

Na classe de declividade II (Tabela 4), comparando-se o rodado de baixo e rodado de cima (comparação na linha, letra grega) nas rodas dianteira, traseira e roda única de cada equipamento, o eixo dianteiro da colhedora TDI, o eixo traseiro da colhedora K3500 e a roda única da colhedora VN, apresentaram maiores pressões dinâmicas no rodado de baixo em comparação com o rodado de cima. Os demais equipamentos não apresentaram diferença estatística de pressões dinâmicas entre o rodado de baixo e o rodado de cima.

Na classe de declividade III para o rodado de baixo, (comparação em linhas), não houve diferença das pressões dinâmicas aplicadas entre as rodas das colhedoras K3500 e Mini TDI. Na colhedora TDI a roda traseira aplicou menor pressão dinâmica do que a roda dianteira e roda única, as quais não diferiram estatisticamente e, na colhedora Case e no transbordo K3, a roda única aplicou maior pressão dinâmica do que as rodas dianteira e traseira, as quais também não diferiram estatisticamente. No rodado de cima para essa classe de declividade a roda única, dianteira e traseira foram estatisticamente iguais, exceto para a colhedora TDI, onde a pressão dinâmica aplicada pela roda traseira foi menor do que as outras duas rodas, que não apresentaram diferenças estatística nas pressões dinâmicas aplicadas. Comparando o rodado de baixo e o rodado de cima em cada umas das rodas de cada equipamento, não foram observadas diferenças estatísticas das pressões dinâmicas aplicadas nas rodas dianteira, traseira e roda única.

Comparando a roda dos equipamentos em cada situação (letras maiúsculas) na classe de declividade II para o rodado de baixo, as colhedoras TDI, Mini TDI e K3500 foram os equipamentos que apresentaram maior pressão dinâmica aplicada ao solo na roda dianteira. A adubadora Miname, o pulverizador Arbus 2000 e o de 400 L foram os equipamentos que apresentaram menor pressão dinâmica aplicada na roda dianteira e, a colhedora VN aplicou pressão dinâmica intermediária na roda dianteira em relação aos demais equipamentos. A roda traseira, no rodado de baixo para essa mesma classe de declividade, a colhedora K3500 aplicou maior pressão dinâmica. As colhedoras TDI, Mini TDI e VN apresentaram pressões dinâmicas intermediárias e, novamente a adubadora Miname, o pulverizador Arbus 2000 e o de 400 L foram os equipamentos que aplicaram as menores pressões dinâmicas. Para os equipamentos dotados de três rodas, a roda única quando estava do lado de baixo, não houve diferença de pressão dinâmica aplicada pelas colhedoras nessa roda, diferindo somente da adubadora Miname e pulverizador Arbus 2000, que também não foram diferentes entre eles, mas aplicaram pressões dinâmicas inferiores às colhedoras.

Na classe de declividade II, comparando os equipamentos no rodado de cima, a colhedora K3500 aplicou a maior pressão dinâmica na roda dianteira (Tabela 4) seguida pela colhedora Mini TDI. As colhedoras TDI, Case e VN as pressões dinâmicas não diferiram estatisticamente e a adubadora Miname, o pulverizador Arbus 2000 e o de 400 L foram os que aplicaram menor pressão dinâmica na roda dianteira. Para essa mesma condição na roda traseira e na roda única dos equipamentos, não houve diferença nas pressões dinâmicas entre as colhedoras TDI, Mini TDI, Case, VN e K3500, porém elas diferiram dos demais equipamentos, que também não diferiram estatisticamente, mas que aplicaram pressões dinâmicas menores do que as colhedoras.

Comparando os equipamentos (coluna) na classe de declividade III para o rodado de baixo (Tabela 4), a colhedora K3500 aplicou maior pressão dinâmica na roda dianteira seguidas pelas colhedoras TDI e Mini TDI. A colhedora Case e o Transbordo K3 as pressões dinâmicas aplicadas não diferiram estatisticamente, sendo inferiores as pressões dinâmicas aplicadas pelas colhedoras K3500, TDI e Mini TDI. Na roda traseira, a colhedora K3500 e a Mini TDI aplicaram as maiores pressões dinâmicas e as colhedoras TDI, Case e o Transbordo K3, aplicaram as menores pressões dinâmicas. Na roda única para essa mesma condição, as colhedoras TDI e Mini TDI não diferiram estatisticamente, mas aplicaram as maiores pressões dinâmicas do que as aplicadas pela colhedora Case e o Transbordo K3 que não diferiram estatisticamente.

Comparando os equipamentos na declividade III para o rodado de cima (Tabela 4), o transbordo K3 aplicou a menor pressão dinâmica em comparação com os demais equipamentos na roda dianteira. Na roda traseira, a colhedora K3500 aplicou a maior pressão dinâmica, seguida pela colhedora Mini TDI. A colhedora TDI e o transbordo K3 aplicaram as menores pressões dinâmicas, não diferindo estatisticamente entre si. Na roda única, as Colhedoras TDI e Mini TDI aplicaram as maiores pressões dinâmicas e o Transbordo K3 aplicou menor pressão dinâmica.

Conforme os modelos de capacidade de suporte de carga mencionados no capítulo anterior, as pressões aplicadas por esses equipamentos na superfície do solo são superiores que a máxima capacidade de carga que o solo é capaz de suportar sem promover alteração na sua estrutura e, desta forma, o uso destas máquinas e equipamentos está degradando a estrutura do solo e, promovendo compactação do solo.

Para a condição sem anteparo nas classes de declividade I e II (Tabela 5), comparando a roda dianteira, a roda traseira e a roda única dos equipamentos (comparação na linha), não houve diferença estatísticas de pressões dinâmicas aplicadas, tanto no rodado de baixo quanto no rodado de cima. Quando foi comparado os rodados de baixo e o rodado de cima (letra grega), somente a colhedora K3500 aplicou menor pressão dinâmica no rodado de cima na roda dianteira para a classe de declividade II.

Tabela 5 - Pressões dinâmicas aplicadas em kPa pelas colhedoras e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira na condição sem anteparo. (Continua)

Equipamento	Sem anteparo					
	Rodado Baixo			Rodado Cima		
	Dianteiro	Traseiro	Única	Dianteiro	Traseiro	Única
Classe de Declividade I						
Colhedora K3500	1164A $\alpha$	1026A $\alpha$	-----	932A $\alpha$	926A $\alpha$	-----
Classe de Declividade II						
Colhedora TDI	782B $\alpha$	784A $\alpha$	1076A $\alpha$	986B $\alpha$	870A $\alpha$	1168A $\alpha$
Colhed. Mini TDI	1158A $\alpha$	1112A $\alpha$	1334A $\alpha$	1334A $\alpha$	1126A $\alpha$	1256A $\alpha$
Colhedora Case	-----	-----	-----	1086A $\alpha$	984A $\alpha$	872A $\alpha$
Colhedora VN	494C $\alpha$	518B $\alpha$	656B $\alpha$	752B $\alpha$	602B $\alpha$	620B $\alpha$
Colhedora K3500	1226A $\alpha$	992A $\alpha$	-----	818B $\beta$	872A $\alpha$	-----
Aduadora Miname	13D $\alpha$	30C $\alpha$	183C $\alpha$	23C $\alpha$	160C $\alpha$	300B $\alpha$

Na Tabela 5 - Pressões dinâmicas aplicadas em kPa pelas colhedoras e equipamentos usados no manejo da lavoura cafeeira na condição sem anteparo. (Conclusão)

Equipamento	Sem anteparo					
	Rodado Baixo			Rodado Cima		
	Dianteiro	Traseiro	Única	Dianteiro	Traseiro	Única
	Classe de Declividade III					
Colhedora TDI	1218Aα	818Cbα	1216Aα	1182Aα	924Baα	1050Aα
Colhed. Mini TDI	936Baβ	1060Baβ	1292Aαβ	1538Aα	1078Bbβ	1086Abβ
Colhedora Case	918Ba	718Ca	784Ba	-----	-----	-----
Colhedora K3500	1296Aα	1530Aα	-----	1382Aα	1374Aα	-----
Transbordo K3	422Cbα	508Cbα	832Baα	432Bbα	466Cbα	768Aα

Legenda: Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna em cada classe de declividade comparando os equipamentos; médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha em cada rodado e; médias seguidas pela mesma letra grega em cada roda comparando o rodado de baixo e o rodado de cima, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott Knott, ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2018).

Na classe de declividade III, comparando as rodas para o rodado de baixo (Tabela 5), não houve diferença para as Colhedoras Mini TDI, Case e K3500. A colhedora TDI aplicou menor pressão dinâmica na roda traseira, enquanto a roda dianteira e a única não diferiram estatisticamente e aplicaram pressões dinâmicas maiores. Para o transbordo K3 não houve diferença significativa nas pressões dinâmicas aplicadas pelas rodas dianteira e traseira, porém na roda única, a pressão dinâmica foi maior. No rodado de cima para essa classe de declividade, o transbordo K3 apresentou esse mesmo comportamento do rodado de baixo. Nessa mesma condição de rodado de cima, não houve diferença significativa nas pressões dinâmicas entre as rodas das colhedoras TDI e K3500. Para a colhedora Mini TDI a roda dianteira aplicou maior pressão dinâmica do que as rodas traseira e única, as quais não foram diferentes entre si. Comparando o rodado de baixo e o rodado de cima nesta classe de declividade, somente a colhedora Mini TDI apresentou maior pressão dinâmica na roda dianteira para o rodado de cima. As demais pressões dinâmicas, não apresentaram diferenças significativas entre as pressões dinâmicas em todas as rodas do rodado de cima em comparação com o rodado de baixo.

Comparando os equipamentos (letras maiúsculas) na classe de declividade II no rodado de baixo (Tabela 5), não houve diferença significativa na roda dianteira entre as colhedoras Mini TDI e K3500, que foram as maiores pressões dinâmicas aplicadas, seguida pela colhedora TDI. Nessa condição a colhedora VN aplicou pressão dinâmica

inferior a essas três colhedoras e a adubadora Miname a menor pressão dinâmica entre as rodas dianteiras. Na roda traseira do rodado de baixo, não houve diferença significativa entre as pressões dinâmicas aplicadas para as colhedoras TDI, Mini TDI e K3500, sendo as maiores pressões dinâmicas aplicadas. A colhedora VN aplicou pressão dinâmica inferior as essas três e a adubadora Miname aplicou a menor pressão dinâmica na roda traseira, sendo esse, o mesmo comportamento da roda dianteira. Na roda única, as colhedoras TDI e Mini TDI não diferiram estatisticamente e foram seguidas pela colhedora VN, e a menor pressão dinâmica foi aplicada pelo transbordo K3.

Na classe de declividade II, comparando os equipamentos no rodado de cima (Tabela 5), a roda dianteira das colhedoras Case e Mini TDI aplicaram as maiores pressões dinâmicas não diferindo estatisticamente, seguidas pelas colhedoras TDI, VN e K3500, que também, não diferiram estatisticamente e a adubadora Miname aplicou a menor pressão dinâmica. Na roda traseira, as maiores pressões dinâmicas aplicadas foram das colhedoras TDI, Mini TDI, Case e K3500, não diferindo estatisticamente, seguida pela colhedora VN que aplicou pressão dinâmica inferior as estas, e a adubadora Miname apresentou a menor pressão dinâmica aplicada nesse rodado traseiro. Na roda única, não houve diferença estatística na pressão dinâmica aplicada entre as colhedoras TDI, Mini TDI e Case, seguida pela colhedora VN e a adubadora Miname, que também não diferiram estatisticamente.

Na classe de declividade III, comparando os equipamentos para a roda dianteira do rodado de baixo (Tabela 5), as pressões dinâmicas aplicadas pelas colhedoras K3500 e a TDI foram as maiores e não diferiram estatisticamente, seguidas pelas pressões dinâmicas aplicadas pelas colhedoras Mini TDI e Case e, o transbordo K3 aplicou a menor pressão dinâmica nessa roda. Na roda traseira a maior pressão dinâmica foi aplicada pela colhedora K3500 seguida pela pressão dinâmica aplicada pela colhedora Mini TDI. As colhedoras TDI e Case, e o transbordo K3 não apresentaram diferenças significativas nas pressões dinâmicas aplicadas, sendo as pressões dinâmicas aplicadas as menores nessa roda traseira. Para a roda única, as colhedoras TDI e Mini TDI foram estatisticamente as maiores pressões dinâmicas aplicadas e a colhedora Case e o transbordo K3 as menores pressões dinâmicas aplicadas.

Nessa mesma classe de declividade, comparando os equipamentos no rodado de cima na roda dianteira (Tabela 5), as colhedoras TDI, Mini TDI e K3500 não

diferiram estatisticamente e aplicaram as maiores pressões dinâmicas e, o transbordo K3 a menor pressão dinâmica nessa roda. Na roda traseira, a colhedora K3500 aplicou a maior pressão dinâmica, seguidas pelas pressões dinâmicas aplicadas pelas colhedoras TDI e Mini TDI e o transbordo K3 aplicou a menor pressão dinâmica nessa roda. Já na roda única, não houve diferença estatística entre as pressões dinâmicas aplicadas nesses equipamentos.

Novamente, agora na condição sem anteparo, as pressões dinâmicas registradas foram maiores que a capacidade de suporte de carga do solo, indicando que o uso destas máquinas e equipamentos está promovendo compactação do solo.

Toda essa metodologia empregada necessita de estudos posteriores para sua consolidação, sendo esta a primeira vez usando um anteparo rígido. Outros trabalhos já realizados usaram a condição de sem anteparo rígido e, numa visão particular, podem ter expressados uma pressão inferior à realidade aplicada pelos maquinários avaliados.

Espera-se que trabalhos posteriores venham corroborar com a metodologia empregado a fim de que as leituras registradas no manômetro sejam representativas das pressões aplicadas de máquinas e equipamentos agrícolas.

#### **4 CONCLUSÕES**

As medições das pressões dinâmicas com anteparo rígido foram superiores às medições sem este anteparo rígido.

As leituras na condição com anteparo rígido são mais representativas do que as leituras na condição sem anteparo rígido, já que representam exclusivamente a deformação da mangueira, enquanto a determinação diretamente sobre o solo pode resultar na deformação do mesmo, subestimando os valores determinados.

A colhedora K3500 foi o equipamento que aplicou maior pressão dinâmica na superfície do solo tanto na condição com e sem o anteparo rígido.

As determinações das pressões dinâmicas com ou sem o anteparo rígido indicaram que o uso das colhedoras e equipamentos estão promovendo compactação do solo.

**REFERÊNCIAS**

ALAOUI, A.; DISERENS, E. Mapping soil compaction – A review. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, London, UK; v. 5, p. 60-66, 2018. Doi; 10.1016/j.coesh.2018.05.003.

ARAUJO-JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. de S.; LEITE, F. P.; GAUDERETO, G. S. Determination of applied pressure on the soil by forest machines using a simple equipment for measurements. In: Escuela Latinoamericana de Física de Suelos, X., 2009, Lavras. **Anales...** Lavras: Universidade Federal de Lavras (UFLA), 2009, p. 116-120.

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, S. R.; SANTOS, N. S.; ARAUJO JUNIOR, C. F. Assessment of the soil compaction of two ultisols caused by logging operations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; (Impresso), v. 32, p. 2245-2253, 2008.

IORI, P.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; GUIMARÃES, P. T. G.; SOUZA, Z. R DE; FIGUEIREDO, V. C. (2014) Seasonal change of soil precompression stress in coffee plantation under sub-humid tropical condition. **Coffee Science**, Lavras, MG; v. 9, p. 145-154, 2014. Doi:10.25186/cs.v9i2.568.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; BARBOZA, R. S.; SOBREIRA, R.B.; SILVA, F. A. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG; v. 8, p. 135-146, 2014.

## APÊNDICES

APÊNDICE A - Sequência de operações para medição das pressões dinâmicas aplicadas pelo maquinário agrícola com o equipamento pressurômetro.



Legenda: A mangueira é estendida no local de passagem do rodado, empregando-se um anteparo rígido para evitar deformação do solo (A); o implemento aproxima-se da mangueira na sua velocidade de trabalho (B); são realizadas leituras nos dois rodados, dianteiro e traseiro (C); a leitura indicada no manômetro do equipamento é registrada (D).



Fonte: Do autor (2019).

APÊNDICE B - Transbordo K3 acompanhado a colhedora K3500.



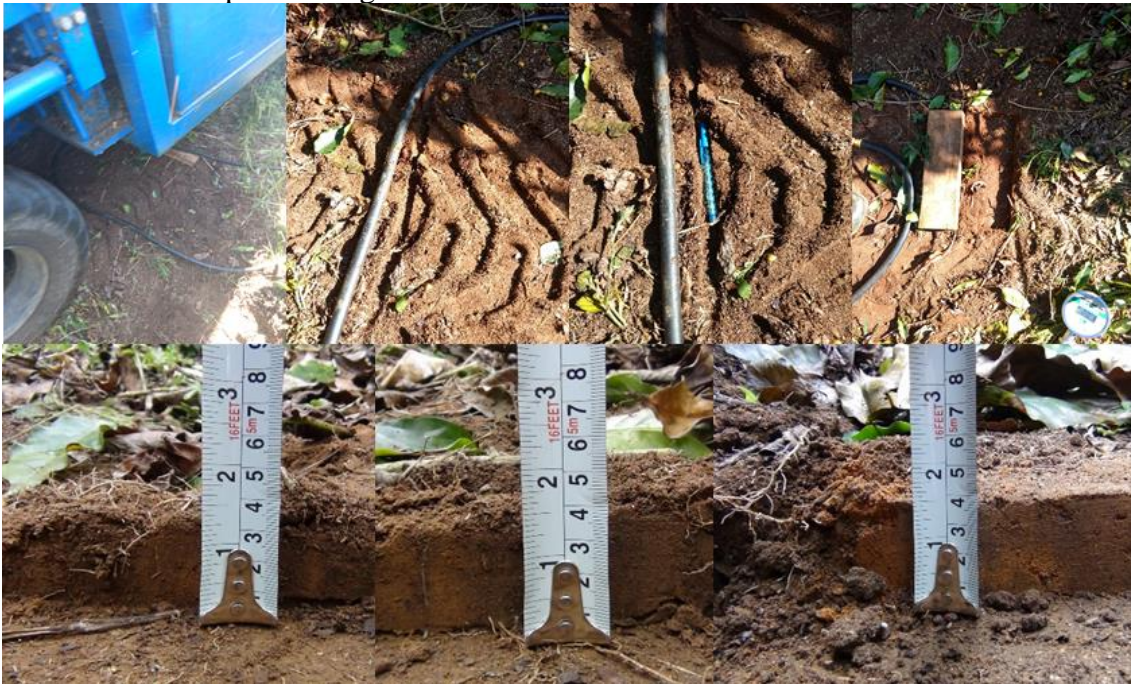
Fonte: O autor.

APÊNDICE C - Pulverizador Arbus 2000 e 400 Litros usados nas medições das pressões dinâmicas.



Fonte: Do autor (2019).

APÊNDICE D - Detalhes da deformação do solo em locais com maior umidade do solo, após o tráfego da colhedora.



Legenda: Medida em centímetros.

Fonte: Do autor (2019).

APÊNDICE E - Detalhe do apêndice anterior ampliado.



Fonte: Do autor (2019).