

TIAGO GUILHERME DE ARAÚJO

**IMPACTOS DA COLHEITA MECANIZADA DE EUCALIPTO EM
PROPRIEDADES FÍSICAS E PERDAS DE SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Júlio César Lima Neves

Coorientador: Teogenes Senna de Oliveira

VIÇOSA
MINAS GERAIS
2023

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A663i
2023 Araújo, Tiago Guilherme de, 1990-
Impactos da colheita mecanizada de eucalipto em
propriedades físicas e perdas de solo / Tiago Guilherme de
Araújo. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (45 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2023.

Referências bibliográficas: f. 38-42.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.752>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Compactação. 2. Eucalipto. 3. Colheita florestal.
4. Solos - Erosão. I. Neves, Júlio César Lima, 1955-.
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
III. Título.

CDD 22. ed. 631.45

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

TIAGO GUILHERME DE ARAÚJO

IMPACTOS DA COLHEITA MECANIZADA DE EUCALIPTO EM
PROPRIEDADES FÍSICAS E PERDAS DE SOLO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de fevereiro de 2023.

Assentimento:


Tiago Guilherme de Araújo

Autor


Júlio César Lima Neves

Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, luz em nossos caminhos.

À minha esposa Fabryelli, meu amor, pelo total apoio e compreensão, sem ela eu não teria conseguido chegar até aqui.

Aos meus pais José Antônio de Araújo (em memória) e Lúcia Maria Guilherme de Araújo por nunca terem medido esforços para promover minha educação.

Aos meus irmãos, Kely, Fernanda e João Antônio pelo carinho, consideração e apoio.

Às minhas avós, Vó Tita (Jovita Belo), Vó Terezinha (em memória) e a Dinha (Afoncina Ramos), minhas referências de sabedoria.

Aos meus sobrinhos, Ana Flávia, Maria Fernanda, Clara e Pedro Artur por tornar nossas vidas mais felizes.

Ao meu cunhado Árthemis, à minha sogra Umbelina, ao meu avô de consideração Sr. Emílio, aos meus tios emprestados Rosalina e José Geraldo e aos meus primos Emanuelli e Gabriel por todo apoio e orações.

Aos amigos da pós-graduação Bernardo, Daniela, Sara, Katherine, Keise e Karin pelo grande apoio nas horas de dificuldade.

Aos amigos do trabalho da CENIBRA, Geraldo Magela, William Gomes, Anderson Rocha, Guilherme Jesus pela ótima convivência e apoio. Em especial à toda equipe do Laboratório de Solos e Qualidade da Madeira da CENIBRA, Jackeline Mota, Ariane, Ingrid, Toni Van, Edson e Luciano.

À toda equipe do Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFV em especial Cláudio, Adriana e Evandro.

Aos amigos da empresa Arboris, Vagno, Gilmar, Vicente, Martineli, Gilson, Makçoel, Edvaldo e Luiz.

Ao meu coorientador Professor Teogenes Senna de Oliveira por todo apoio.

Ao meu orientador Professor Júlio César Lima Neves por todo conhecimento compartilhado de forma tão generosa.

Ao Fernando Palha Leite pela confiança e por todos os ensinamentos compartilhados.

À Empresa CENIBRA pela oportunidade.

Ao Programa de Pós-graduação de Solos e Nutrição de Plantas da UFV.

Ao Departamento de Solos da UFV.

À Universidade Federal de Viçosa – Campus Viçosa.

Dedico

RESUMO

ARAÚJO, Tiago Guilherme, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Impactos da colheita mecanizada de eucalipto em propriedades físicas e perdas de solo**
Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientador: Teogenes Senna de Oliveira.

A colheita florestal de eucaliptos em regiões de relevo declivosos tem sido um grande desafio. A escassez e ao alto custo da mão-de-obra florestal, além dos riscos de segurança e condições ergonômicas da colheita manual, torna cada vez maior a necessidade de mecanização das atividades. Uma recente evolução das máquinas de colheita, utilizando cabo auxiliar para ancoragem das máquinas, permitiu o avanço da colheita mecanizada em áreas declivosas e atualmente, no sistema de toras curtas, é possível realizar a atividade com segurança em declividades de até 35°. As operações mecanizadas podem causar impactos negativos às propriedades físicas do solo, principalmente compactação do solo. Em terrenos declivosos, a compactação juntamente com a desestruturação da camada superficial do solo pode aumentar o risco da ocorrência de processos erosivos. Dessa forma, é fundamental a realização de estudos que quantifiquem os possíveis impactos causados ao solo pela colheita mecanizada no sistema de toras curtas em terrenos com diferentes classes de declividade. O objetivo desse trabalho foi avaliar, em diferentes classes de declividade, o efeito do tráfego de máquinas do sistema mecanizado de colheita de toras curtas de eucalipto sobre propriedades físicas do solo. Em duas regiões no leste de Minas Gerais, nas quais a colheita do eucalipto foi realizada em período chuvoso, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo em locais com tráfego (CT) e sem tráfego (ST) do equipamento de baldeio de madeira (forwarder) em três classes de declividade, 0-17°, 17-27° e 27-35°. Em laboratório, foram realizadas as análises físicas de umidade, densidade do solo (Ds), densidade de partículas (Dp), análise granulométrica, microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), porosidade total (PT), curva de retenção de água no solo (CRA), e obtido os valores de Índice S (IS), assim como, análises químicas de rotina. Em campo, foi feita avaliação da resistência do solo à penetração (RSP) com penetrômetro de impacto, comparando áreas CT e áreas ST de forwarder. Também foi realizado uma quantificação da movimentação de solo nas três classes de declividade em estudo, por meio do método de pinos de erosão, onde os pinos foram distribuídos nas áreas e avaliados mensalmente durante um período chuvoso. Com base no resultado da movimentação do solo, foi estimado o total de nutrientes e Carbono orgânico perdidos no período. Após as análises dos resultados podemos fazer as seguintes conclusões: 1) O tráfego de máquinas causou efeito negativo na maioria das propriedades físicas avaliadas e na movimentação de solo, e a ordem decrescente de relevância por classe de declividade foi 27-35° > 17-27° > 0-17°. 2) A movimentação de

solo é maior nas classes de maior declividade, podendo ser influenciada pelo comprimento de rampa; 3) As perdas de nutrientes, com a movimentação de solo devem ser computadas no balanço de nutrientes para a recomendação de adubação dos plantios florestais.

Palavras chave: Eucalipto; Compactação; Colheita Florestal; Declividade; Erosão.

ABSTRACT

ARAÚJO, Tiago Guilherme, M.Sc, Federal University of Viçosa, February, 2023. **Impacts of mechanized eucalyptus harvesting on physical properties and soil losses.** Advisor: Julio Neves. Co-advisers: Teógenes Senna de Oliveira.

Forest harvesting of eucalyptus in regions with steep terrain has been a major challenge. The scarcity and high cost of forestry labor, in addition to the safety risks and ergonomic conditions of manual harvesting, increases the need for mechanization of activities. A recent evolution of harvesting machines, using an auxiliary cable to anchor the machines, has allowed the advancement of mechanized harvesting in sloped areas and currently, in the cut-to-length system, it is possible to carry out the activity safely on slopes of up to 35°. Mechanized operations can cause negative impacts on the physical properties of the soil, mainly soil compaction. On steep terrain, compaction together with the disruption of the surface layer of the soil can increase the risk of erosion. Therefore, it is essential to carry out studies that quantify the possible impacts caused to the soil by mechanized harvesting using the cut-to-length system on land with different slope classes. The objective of this work was to evaluate, in different slope classes, the effect of machine traffic from the mechanized cut-to-length system eucalyptus logs on the physical properties of the soil. In two regions in the east of Minas Gerais, in which eucalyptus harvesting was carried out during the rainy season, deformed and undisturbed soil samples were collected in locations with traffic (CT) and without traffic (ST) of wood transfer equipment (forwarder) in three slope classes, 0-17°, 17-27° and 27-35°. In the laboratory, physical analyzes of humidity, bulk density (Ds), particle density (Dp), granulometric analysis, microporosity (Mi), macroporosity (Ma), total porosity (PT), water retention curve in the soil (CRA), and S Index (IS) values were obtained, as well as routine chemical analyses. In the field, soil resistance to penetration (RSP) was assessed with an impact penetrometer, comparing CT areas and ST areas of the forwarder. A quantification of soil movement was also carried out in the three slope classes under study, using the erosion pin method, where the pins were distributed in the areas and evaluated monthly during a rainy period. Based on the results of soil movement, the total nutrients and organic carbon lost during the period were estimated. After analyzing the results, we can make the following conclusions: 1) Machine traffic caused a negative effect on most of the physical properties evaluated and on soil movement, and the decreasing order of relevance by slope class was 27-35° > 17- 27° > 0-17°. 2) Soil movement is greater in classes with higher slopes, and may be influenced by the length of the ramp; 3) Nutrient losses due to soil movement must be included in the nutrient balance to recommend fertilization for forest plantations.

Keywords: Eucalyptus; Compaction; Forest Harvest; Slope; Erosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização das áreas experimentais	14
Figura 2 - Histórico mensal de precipitação e temperatura média das áreas experimentais	15
Figura 3 - Modelo do pino de erosão utilizado e exemplo da localização dos pinos nas parcelas	20
Figura 4 - Precipitação acumulada mensal (mm) durante o período de acompanhamento da movimentação do solo	21
Figura 5 - Densidade do solo na camada de 10 a 20 cm de profundidade	24
Figura 6 - Porosidade Total do solo na camada de 10 a 20 cm	25
Figura 7 - Microporosidade do solo na camada de 10 a 20 cm	26
Figura 8 - Macroporosidade do solo na camada de 10 a 20 cm	27
Figura 9 - Resistência do solo à penetração na camada de 10 - 20 cm	29
Figura 10 - Índice S do solo na camada de 10 – 20 cm	31
Figura 11 - Gráficos de resistência à penetração e umidade da Região Baixa nas classes de declividade de 0-17°, 17-27° e 27-35°, profundidade 0-60 cm.....	43
Figura 12 - Gráficos de resistência à penetração e umidade do solo da Região Alta nas classes de declividade de 0-17°, 17-27° e 27-35°, profundidade 0-60 cm	44
Figura 13 - Curvas de retenção de água no solo nas classes de declividade de 0-17°, 17-27° e 27-35° para as duas regiões, em amostras coletadas na profundidade de 10-20 cm	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de declividade em estudo, declividade média de cada área, comprimentos de rampa, posição na paisagem e classificação dos solos em cada local.....	16
Tabela 2 - Análise granulométrica das duas regiões de estudo, em amostras coletadas nas áreas com tráfego (CT) e sem tráfego (ST) de máquinas em diferentes classes de declividade (0-17°, 17-27°, 27-35°) e profundidades (0-20 cm)	19
Tabela 3 - Umidade gravimétrica do solo na camada de 10 - 20 cm	29
Tabela 4 - Resultados das análises químicas do solo das duas áreas estudadas	35
Tabela 5 – Valores de movimentação de solo e estimativa de perda de nutrientes	36

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
2.1 Desenho Experimental.....	14
2.2 Coleta e Análise de Solo.....	17
2.3 Análise Estatística.....	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
3.1 Densidade do Solo (Ds).....	23
3.2 Porosidade - Total (PT), Macro (Ma) e Micro (Mi).....	25
3.3 Resistência do Solo à Penetração (RSP).....	27
3.4 Índice S.....	30
3.5 Movimentação de solo, nutrientes e carbono orgânico pelo método pinos de erosão.....	31
4. CONCLUSÕES.....	37
5. REFERÊNCIAS.....	38
APÊNDICE A – Gráficos de Resistência à Penetração e Umidade do Solo.....	43
APÊNDICE B – Curvas de Retenção de Água no Solo.....	45

1. INTRODUÇÃO

O setor brasileiro de florestas plantadas tem relevante importância na economia nacional, ocupando uma área de 9,93 milhões de hectares. O valor bruto da produção desse setor no ano de 2021 foi de US\$ 244,6 bilhões, arrecadando US\$ 16,7 bilhões em tributos, que gerou um saldo na balança comercial da indústria nacional de base florestal de US\$ 10,7 bilhões e 2 milhões de empregos diretos e indiretos (IBÁ, 2022).

A produtividade dos plantios de eucaliptos no Brasil em relação à década de 70 do século XX aumentou expressivamente de uma média de 15 a 20 m³/ha/ano para 38,9 m³/ha/ano, no entanto, nos últimos anos tem apresentado estagnação e até ligeiras quedas como ocorrido em 2020 atingindo o valor de 36,8 m³/ha/ano. Mudanças climáticas, expansão para novas fronteiras de cultivo, ataque de novas pragas são comumente indicados como as principais causas desses resultados (IBÁ, 2022). Pouco se discute em relação ao manejo do solo que vem sendo usado, onde muitas vezes o limite da capacidade de suporte de carga está sendo ultrapassado, tornando-se mais um fator com influência negativa sobre a produtividade.

Atualmente existem quatro principais sistemas de colheita florestal, o sistema de toras curtas (Cut to length), o de toras longas (Tree-Length), o semi-mecanizado e o motorizado. No sistema de toras curtas, por meio do uso do equipamento Harvester, a árvore é abatida e em seguida é processada no interior do talhão, podendo haver descascamento ou não dentro do talhão e depois, o equipamento Forwarder transporta a madeira para a borda do talhão. No sistema de toras longas, o abate das árvores é feito pelo equipamento modelo Feller Buncher, em seguida as árvores são arrastadas de forma inteira pela máquina Skidder ou Clambunk para a borda do talhão onde é processada pela Garra Traçadora. Já no sistema semi-mecanizado as árvores são derrubadas com motosserra e as demais atividades são realizadas com o auxílio de outras máquinas, podendo ser as do sistema de toras curtas ou de toras longas. Por fim, no sistema motorizado as árvores são derrubadas e processadas com motosserra e as demais atividades são realizadas de forma manual (MALINOVSKI *et al.*, 2002).

Com a redução da disponibilidade e ao encarecimento da mão-de-obra florestal, além das condições ergonômicas e de segurança das atividades manuais em áreas de colheita florestal, a busca por mecanização das atividades tornou-se uma constante. Para áreas declivosas, o desafio se torna ainda maior.

Entre os anos de 2013 e 2014, para o sistema de colheita de toras curtas, ocorreu uma adaptação no conjunto Harvester + Forwarder por meio da instalação de guincho auxiliar de tração, tornando possível operar em áreas de 27° a 35° de forma mecanizada e segura, onde anteriormente não seria possível mecanizar (GARREN *et al.*, 2019). Essa evolução traz consigo um questionamento: se esse tipo de operação pode afetar de alguma forma a qualidade física do solo, além daquilo que já ocorre em classes de declividade menores, principalmente em relação à compactação do solo e a processos erosivos.

Com a compactação, o crescimento do sistema radicular é afetado negativamente, pois ocorre redução da absorção de nutrientes e água (SILVA, S. R. *et al.*, 2002). A compactação causa redução nos fluxos entre o solo e as raízes, gerando uma menor entrada de água e nutrientes e menor transpiração, tal condição pode comprometer temporariamente ou de forma definitiva o potencial produtivo do solo (DEDECEK; GAVA, 2005; JESUS *et al.*, 2015).

O uso do guincho auxiliar faz obrigatoriamente as máquinas terem que trabalhar no sentido morro abaixo, e o rastro deixado pelas máquinas, principalmente do forwarder gera um caminho preferencial para o escoamento de água do terreno, potencializando o risco de erosão nas áreas mais íngremes, principalmente nas fases iniciais dos plantios. Em relação a processos erosivos é de conhecimento que são os principais causadores do empobrecimento dos solos, além de poderem causar assoreamento de rios e nascentes.

Os processos erosivos principalmente das camadas mais superficiais do solo causam perdas diretas de nutrientes e de carbono orgânico, os quais são fatores fundamentais para a sustentabilidade produtiva de um sítio florestal.

Para verificar os possíveis impactos causados pela mecanização nas propriedades físicas do solo, algumas características e indicadores podem ser utilizados, tais como: Densidade do Solo, Porosidade (Total, Macro e Micro), Resistência do Solo à Penetração (CARNEIRO *et al.*, 2009) e o Índice S (DEXTER, 2004).

De acordo com Ferreira (2010):

Densidade do Solo (Ds): Representa a relação entre a massa de solo seco em estufa e o seu respectivo volume total.

Porosidade Total (PT): Representa a fração do solo em volume não ocupada por sólidos, é a soma da macroporosidade mais a microporosidade.

Macroporosidade (Ma): Representa a fração do solo em volume não ocupada por sólidos com diâmetro maior que 50 μm .

Microporosidade (Mi): Representa a fração do solo em volume não ocupada por sólidos com diâmetro menor que 50 μm .

Resistência do Solo à Penetração (RSP): Método que busca estimar a resistência à penetração das raízes no solo, através de equipamentos do tipo penetrômetro.

Índice S: é um indicador da qualidade física e estrutural do solo. Consiste na declividade da curva de retenção de água do solo no seu ponto de inflexão. Seu valor representa a proporção de poros, por tamanho, de maior frequência em uma determinada amostra de solo. Quanto maior o valor do índice S, melhor é a qualidade física do solo (DEXTER, 2004).

Para quantificar o processo erosivo alguns métodos podem ser utilizados, entre eles, o método dos pinos de erosão cravados no solo, que permite avaliar as alterações de superfície do solo e assim quantificar as movimentações do mesmo (BONO *et al.*, 1996; KEARNEY *et al.*, 2018; RIOS, 2019; SANTOS *et al.*, 1998).

Assim, atualmente existe a demanda de estudos para promover o conhecimento sobre os impactos da colheita mecanizada em diferentes classes de declividades, de forma a subsidiar a obtenção de novas tecnologias, equipamentos e adequações de manejo.

Desta forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar, em diferentes classes de declividades, o efeito do tráfego de máquinas do sistema mecanizado de colheita de toras curtas de eucalipto sobre algumas propriedades físicas do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Desenho Experimental

Os experimentos tiveram início no primeiro semestre de 2021 e foram realizados em áreas comerciais de eucalipto da empresa CENIBRA, em duas regiões (Figura 1), uma no município de Santana do Paraíso-MG, a $19^{\circ}24'45''\text{S}$ e $42^{\circ}26'54''\text{W}$, com altitude de 300 m, temperatura média de $23,3^{\circ}\text{C}$, precipitação anual de 1190 mm que foi denominada nesse trabalho como região baixa (RB), e a outra no município de Antônio Dias-MG, a $19^{\circ}27'40''\text{S}$ e $42^{\circ}46'57''\text{W}$ com altitude de 750 m, temperatura média de 18°C , precipitação anual de 1252 mm que foi denominada nesse trabalho como região alta (RA) (Figura 2). A cobertura vegetal original na região é de Floresta Estacional Semidecidual, mas atualmente predominam pastagens e florestas comerciais de eucalipto.

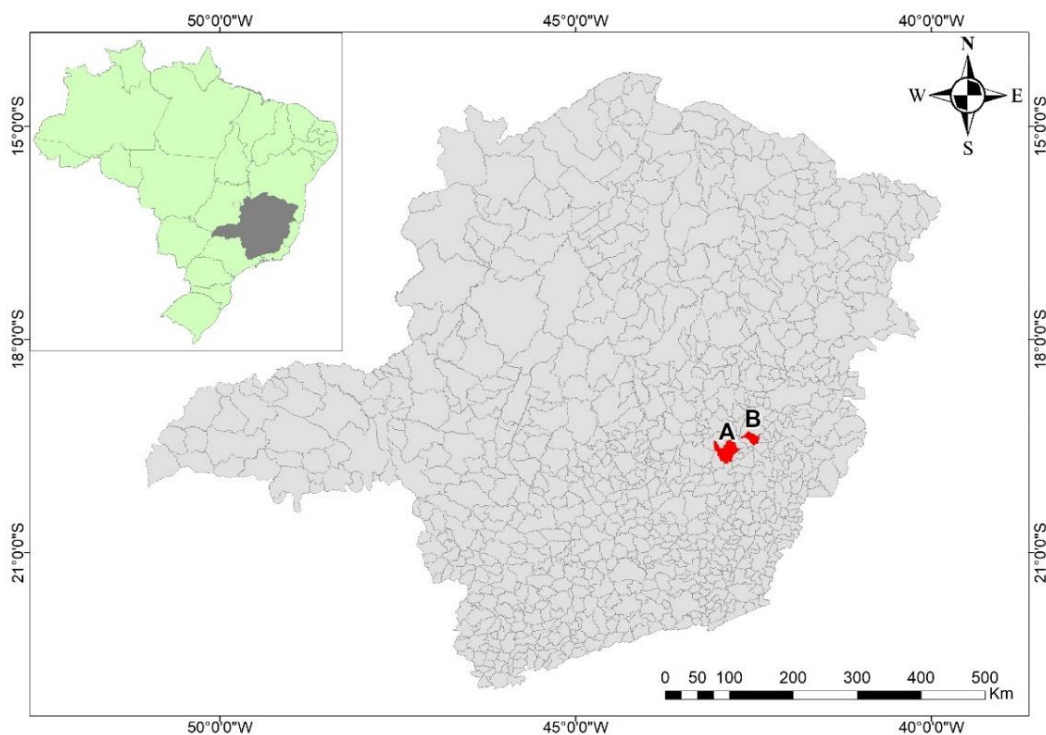


Figura. 1 - Localização das áreas experimentais nos municípios de Antônio Dias-MG (Região Alta) (RA) e Santana do Paraíso-MG (Região Baixa) (B).

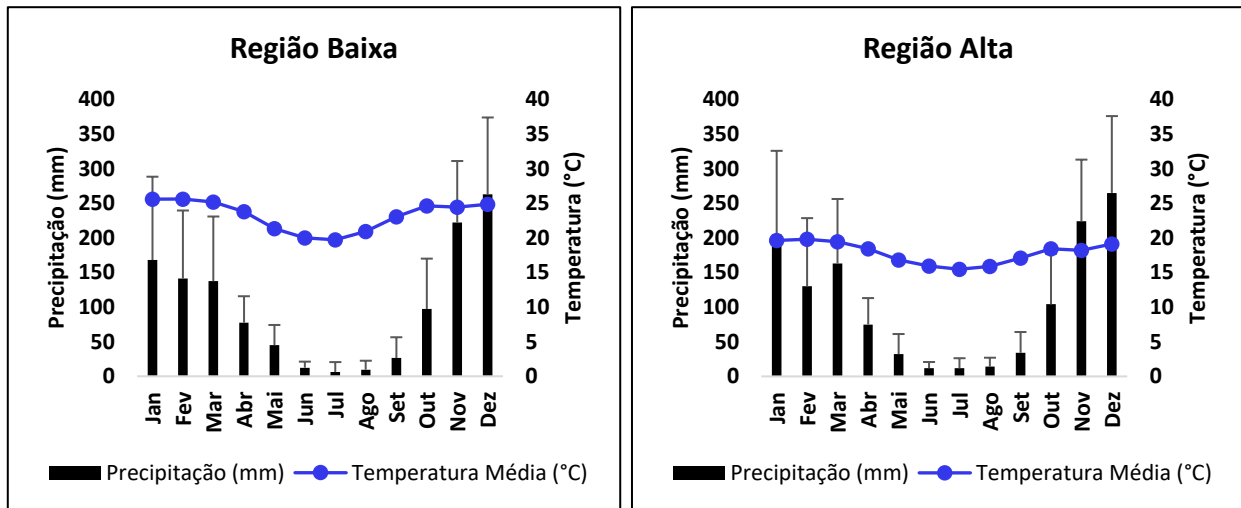


Figura 2. Histórico mensal de precipitação e temperatura média registrado para as duas regiões em estudo no período entre 2000 e 2021. Os dados foram obtidos em estação meteorológica localizada em um raio de aproximadamente 10 km do local dos experimentos. Fonte: CENIBRA.

Em cada região foram escolhidas três áreas com plantios de eucalipto nas seguintes classes de declividade 0-17°, 17-27° e 27-35°. A escolha por essas classes está relacionada com a capacidade atual de realização da atividade de subsolagem e o tipo de equipamento utilizado para realizá-la. É importante salientar que a subsolagem é uma das principais técnicas de conservação do solo utilizada para reduzir os efeitos da compactação na linha de plantio, reforçando os benefícios do cultivo mínimo conforme apresentado por GONÇALVES et al. (2000) e REICHERT et al. (2021).

Na classe de 0 a 17° de declividade os tratores de pneus conseguem operar com o mínimo risco de tombamento lateral, pois normalmente a subsolagem é feita com o objetivo conservacionista de cortar o sentido de deslocamento da água das chuvas, fazendo com que os tratores com os implementos subsoladores tenham que operar perpendicularmente ao declive.

Na classe de declividade de 17 a 27° escavadoras hidráulicas foram adaptadas para realizar a atividade de subsolagem com qualidade e segurança também cortando o sentido de deslocamento da água das chuvas (CUNHA *et al.*, 2020).

Entre 27 e 35° é onde atualmente a subsolagem não é realizada em função da limitação dos equipamentos disponíveis, gerando um alerta ainda maior para essas áreas sobre a condição física do solo. Dessa forma, a avaliação da condição física do solo nessas classes de declividade logo após a colheita, permitiu verificar a real situação de como essas áreas estão sendo disponibilizadas para as atividades seguintes do manejo florestal.

Algumas características das áreas experimentais são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Classes de declividade em estudo, declividade média de cada área, comprimentos de rampa, posição na paisagem e classificação dos solos em cada local.

Região	Classe Declividade	Declividade Média	Comprimento de Rampa	Posição na Paisagem	Classificação do Solo
	°	°	m	-	-
Baixa	0-17	3,2	150	Baixada	Neossolo Flúvico Caulínítico
	17-27	19,8	50	Encosta	Cambissolo Háptico Distrófico Latossólico Caulínítico
	27-35	31,4	50	Encosta	Cambissolo Háptico Distrófico Caulínítico
Alta	0-17	13,6	60	Topo de Morro	Latossolo Amarelo Ácrico Típico Gibbsítico-Oxídico
	17-27	21,1	85	Encosta	Latossolo Amarelo Ácrico Típico Gibbsítico-Oxídico
	27-35	32,0	65	Encosta	Cambissolo Háptico Distrófico Gibbsítico-Oxídico

O povoamento de eucalipto foi colhido no período chuvoso entre fevereiro e março de 2021, por meio do sistema de colheita de toras curtas, com o uso de trator florestal harvester (marca Ponsse, modelo Ergo) peso de 21,5 Mg. Os resíduos de casca, galhos e folhas foram mantidos nas áreas de estudo. A extração da madeira foi feita com trator florestal autocarregável forwarder (marca Ponsse, modelo Elephant), com peso de 22,8 Mg, carregado com 36 m³ de madeira (densidade básica de 490 kg m⁻³), podendo operar com um valor total de até 40 Mg quando carregado.

O peso mais elevado, quando carregado, torna o forwarder o principal causador de impactos ao solo durante o processo de colheita no modelo de toras curtas, principalmente nos períodos chuvosos (DIAS JUNIOR *et al.*, 2005), e foi por esse motivo que este trabalho foi focado em avaliar os possíveis impactos causados pelo equipamento forwarder.

Na classe de declividade de 27-35° as máquinas de colheita acionaram o guincho auxiliar e trabalharam ancoradas em pontos fixos, por meio dos cabos de aço para realizarem a colheita e o baldeio da madeira. Nas classes de 0-17° e 17-27° as máquinas operaram sem uso do guincho auxiliar.

Com base no histórico das áreas fornecido pela empresa e com o auxílio da ferramenta MapBiomias (SOUZA *et al.*, 2020) pode-se afirmar que, para a RB, ocorreram no mínimo quatro rotações de 7 anos com cultivo de eucalipto e para a RA três rotações, ou seja, as áreas em estudo passaram por pelo menos três processos de colheita.

Ainda em relação ao histórico de mecanização das áreas, pode-se afirmar que para classe de declividade de 0-17°, nas rotações anteriores, a colheita foi realizada de forma mecanizada, assim como atividades silviculturais. Já na classe de 17-27° apenas as atividades de colheita foram realizadas de forma mecanizada, e na classe de 27-35° foi a primeira vez que a colheita ocorreu de forma mecanizada.

2.2 Coleta e Análise de Solo

Para as análises físicas do solo, as coletas foram feitas nas duas regiões nas três classes de declividade e em duas situações de tráfego, uma com tráfego do forwarder (CT) e outra sem tráfego do forwarder (ST) realizando 14 repetições para cada situação. As parcelas foram de 40 m de comprimento e 6 m de largura, com 240 m² de área, sendo duas linhas de 16 plantas totalizando 32 plantas para cada parcela. Não foi feito o controle do número de vezes que o forwarder passou na área trafegada.

Para avaliação das características físicas do solo, no ponto central de cada parcela, a camada de serrapilheira foi removida, e em seguida realizada a coleta de amostra de solo indeformada usando o amostrador do tipo Uhland com anel metálico de aproximadamente 100 cm³, sendo coletada uma amostra na camada de 10-20 cm de profundidade do solo, por ter sido essa a profundidade que apresentou, em estudos preliminares (Apêndice A), a maior resistência à penetração. Situação também observada por DEDECEK; GAVA, (2005); DIAS JUNIOR et al. (2003); JESUS et al. (2015).

A resistência do solo à penetração (RSP) foi determinada até a profundidade de 60 cm, por meio do uso do penetrômetro de impacto modelo STOLF (STOLF; FERNANDES; FURLANI NETO, 1983) próximo ao ponto da coleta do anel. Os dados foram analisados com programa computacional desenvolvido por STOLF et al (2014). Próximo ao ponto onde foi determinada a RSP, amostras deformadas de solo também foram coletadas, acondicionadas em sacos plásticos, que foram vedados e levados ao laboratório logo após a coleta, para determinação da umidade do solo das camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade.

Nas amostras coletadas em anéis foram determinados em laboratório: a microporosidade (Mi) após equilíbrio na mesa de tensão a 6 kPa, a densidade do solo (Ds) pelo método do anel volumétrico e a densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico. A porosidade total (PT) foi obtida pela equação $PT=1 - (Ds/Dp)$ e a macroporosidade (Ma) dada pela diferença entre PT e Mi.

A curva de retenção de água no solo foi determinada para cada uma das 168 amostras indeformadas coletadas, os pontos obtidos para ajustar o modelo foram 6, 10, 30, 100, 500 e 1500 kPa. Os pontos de 6 e 10 kPa foram obtidos na mesa de tensão e os pontos 30, 100, 500 e 1500 kPa foram obtidos na câmara de Richards. Os dados foram ajustados com o auxílio do software SWRC Fit (Soil Water Retention Curve) (SEKI, 2007) ao modelo de Van Genuchten, (VAN GENUCHTEN, 1980) Equação 1.

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_r \quad \text{Equação 1.}$$

em que, θ = umidade do solo, em m^3m^{-3} ; θ_s = umidade do solo na saturação, em m^3m^{-3} e; θ_r = umidade residual do solo, em m^3m^{-3} ; h = tensão da água no solo, em kPa; α , m e n = parâmetros de ajuste, sendo α expresso em kPa, e m e n adimensionais. Foi adotada ao modelo a restrição de Mualem (MUALEM, 1976), em que $m = 1 - 1/n$.

O Índice S foi obtido por meio dos parâmetros do modelo de van Genuchten como proposto por Dexter (2004), Equação 2.

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[\frac{2n-1}{n-1} \right] \left(\frac{1}{n} - 2 \right) \quad \text{Equação 2.}$$

em que, θ_s = umidade do solo na saturação, em m^3m^{-3} ; θ_r = umidade residual do solo, em m^3m^{-3} e n = parâmetro de ajuste, adimensional. É importante destacar que os valores do Índice S são negativos, porém nesse trabalho, foram apresentados sempre em módulo. O θ_s foi estimado sendo utilizado o mesmo valor da Pt.

Nas amostras deformadas coletadas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm de profundidade fez-se a determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico após 48 horas em estufa a 105 °C.

Para caracterização das áreas (Tabela 2), foram coletadas amostras para análises de granulometria do solo, na camada de 0-20 cm e de 20-40 cm, sendo 14 amostras simples para uma amostra composta de cada classe de declividade e tipo de tráfego. A análise de granulometria foi realizada segundo metodologia descrita pela (EMBRAPA, 2017), com adaptações de RUIZ (2005), com agitação lenta (50 opm por 16 horas) efetuada em amostras deformadas.

As análises físicas foram realizadas no laboratório de Física do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa e as análises químicas e de umidade no Laboratório de Solos da Empresa CENIBRA.

Tabela 2. Análise granulométrica das duas regiões de estudo, em amostras coletadas nas áreas com tráfego (CT) e sem tráfego (ST) de máquinas em diferentes classes de declividade (0-17°, 17-27°, 27-35°) e profundidades (0-20, 20-40 cm).

Região	Local da Coleta	Classe Declividade	Camada do solo	Argila	Silte	Areia	Classificação
				-----kg kg ⁻¹ -----			
		°	cm				
Baixa	Sem Tráfego	0-17	0-20	0,49	0,07	0,44	Argiloso
		0-17	20-40	0,53	0,08	0,39	Argiloso
		17-27	0-20	0,64	0,06	0,30	Muito Argiloso
		17-27	20-40	0,67	0,07	0,27	Muito Argiloso
		27-35	0-20	0,67	0,08	0,26	Muito Argiloso
		27-35	20-40	0,68	0,08	0,24	Muito Argiloso
	Com Tráfego	0-17	0-20	0,57	0,07	0,36	Argiloso
		0-17	20-40	0,59	0,09	0,32	Argiloso
		17-27	0-20	0,70	0,07	0,24	Muito Argiloso
		17-27	20-40	0,70	0,07	0,23	Muito Argiloso
		27-35	0-20	0,69	0,09	0,23	Muito Argiloso
		27-35	20-40	0,71	0,08	0,21	Muito Argiloso
Alta	Sem Tráfego	0-17	0-20	0,53	0,02	0,45	Argiloso
		0-17	20-40	0,51	0,03	0,46	Argiloso
		17-27	0-20	0,51	0,02	0,47	Argiloso
		17-27	20-40	0,54	0,03	0,43	Argiloso
		27-35	0-20	0,41	0,05	0,54	Argiloso
		27-35	20-40	0,62	0,05	0,33	Muito Argiloso
	Com Tráfego	0-17	0-20	0,55	0,04	0,42	Argiloso
		0-17	20-40	0,54	0,05	0,42	Argiloso
		17-27	0-20	0,51	0,00	0,48	Argiloso
		17-27	20-40	0,52	0,02	0,46	Argiloso
		27-35	0-20	0,59	0,05	0,36	Argiloso
		27-35	20-40	0,62	0,05	0,32	Muito Argiloso

Análise de granulometria determinada pelo método da pipeta (RUIZ, 2005); Classificação textural conforme (SIBCS, 2018).

Para a quantificação da movimentação de solo, nutrientes e carbono orgânico, na mesma área onde foram realizadas as coletas para análise física, para cada classe de declividade foram identificadas 14 parcelas em locais com tráfego de forwarder (CT) e 14 parcelas em locais sem tráfego de forwarder (ST). As parcelas foram de 20 m de comprimento e 6 m de largura, com 120 m² de área, sendo duas linhas de 8 plantas totalizando 16 plantas para cada parcela.

No mês de julho de 2021 foi feito o plantio nas áreas experimentais da região baixa e no mês de agosto na região alta com um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. O plantio foi realizado em cultivo mínimo com espaçamento de 3,0 x 2,5 m em covas manuais, cujas dimensões foram 30 x 30 x 30 cm.

Para adubação de plantio, foram utilizados 100 g de NPK 06-30-06 + 0,7% B + 1% Zn + 1% Cu em coveta lateral por planta, uma aplicação de calcário dolomítico equivalente 2500 kg/ha, e 350 kg/ha NPK 06-10-29 + 0,7% B + 0,5% Zn + 0,5% Cu aplicado em cobertura aos 3 meses. Durante todo o período de monitoramento as áreas foram mantidas livres de plantas daninhas e quando necessário foi utilizado herbicida.

Com o objetivo de avaliar durante um período chuvoso a movimentação de solo, e baseado nos trabalhos de (MELLO et al., 2007; SILVA, et al., 2009) em que se demonstra que o período entre novembro a março são os meses com maior incidência de chuvas erosivas para o estado de Minas Gerais, instalou-se em 28/10/2021, 2 pinos de erosão (estacas de madeira) de 0,50 m a uma profundidade de 0,20 m (superfície de referência), para cada uma das parcelas, conforme Figura 3, totalizando 28 pinos de erosão para cada tratamento avaliado:

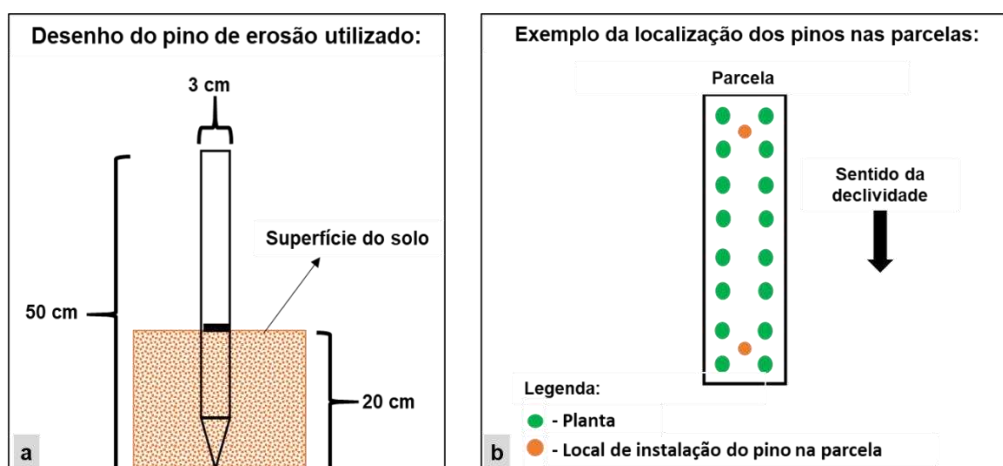


Figura 3. Modelo do pino de erosão utilizado (a) e exemplo da localização dos pinos nas parcelas (b).

Mensalmente os pinos foram monitorados e por meio de trena métrica foi medido e anotado a variação da superfície do solo em relação ao ponto de referência marcado em cada

pino, com objetivo de avaliar a deposição e a remoção de solo como também realizado por BONO et al., (1996); KEARNEY et al., (2018); RIOS, (2019); SANTOS et al., (1998). Após a quinta avaliação foi feita a média dos valores absolutos das variações de superfície para cada pino e chegou-se ao valor h utilizado na Eq.3 para o cálculo da movimentação do solo.

Durante o período avaliado, ocorreu a perda de 5 pinos de erosão instalados, causado por animais e enxurrada. No total ocorreu a perda de 3 pinos na região baixa e 2 na região alta dos 336 instalados. Esses pinos foram repostos no momento da identificação da perda, e no mês que isso ocorreu o resultado do pino foi desconsiderado.

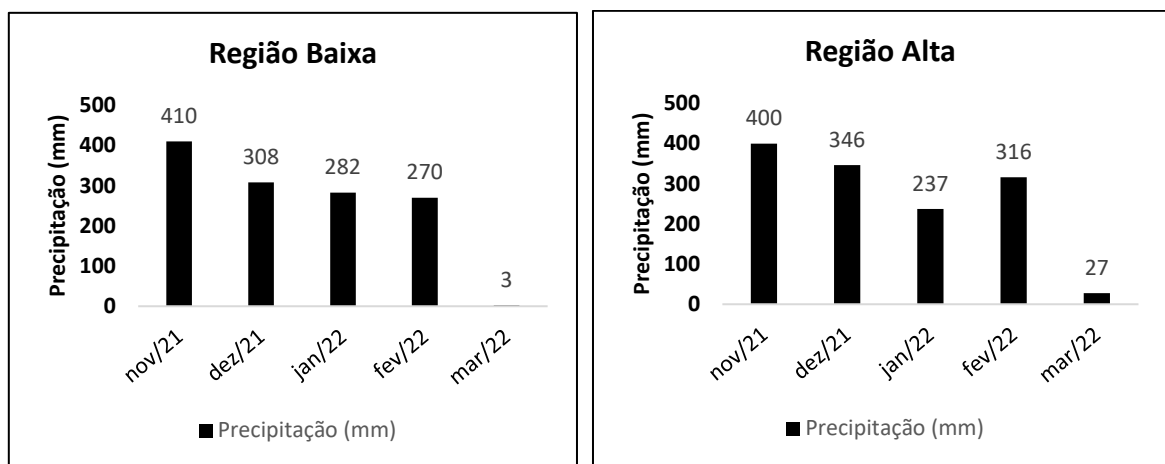


Figura 4. Precipitação acumulada mensal (mm) durante o período de acompanhamento entre Nov/2021 a Mar/2022 da movimentação de solo. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA).

Para quantificar o volume de solo movimentado foi usado a seguinte Equação 3.

$$M = h \cdot A \cdot D_s \cdot F_c \quad \text{Equação 3.}$$

Sendo, M = movimentação de solo, em Mg ha^{-1} ; h = média aritmética de alteração de nível de superfície do solo, medida nos pinos, em metros (m); A = área considerada (120 m^2); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); F_c = fator de correção para hectare.

Com o objetivo de estimar a quantidade de nutrientes e carbono orgânico perdidos durante o período avaliado, foi feita uma coleta de amostras deformadas de solo, em junho de 2022, na profundidade de 0 a 10 cm em 10 parcelas de cada tratamento para análises químicas.

Para as análises químicas, as amostras foram secas ao ar, destorroadas, passadas através de peneiras de 2 mm de malha, homogeneizadas e, posteriormente, submetidas às análises. Foram

determinados pH em água; Al, Ca e Mg trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; P e K extraídos pelo Mehlich-1, de acordo com método descrito por Defelipo & Ribeiro (DEFELIPO; RIBEIRO, 1997). Nos extratos, os teores de P foram determinados por colorimetria (BRAGA; DEFELIPO, 1974), os de K por fotometria de chama e os de Ca, Mg e Al por espectrofotometria de absorção atômica (AOAC, 1975). O P remanescente foi determinado de acordo com (ALVAREZ V. *et al.*, 2000).

O cálculo de perda de nutriente e carbono orgânico foi feito conforme a Equação 4.

$$P_{Nut} = \frac{M * V_{Nut}}{Ds * 1000} \quad \text{Equação 4.}$$

Sendo, P_{Nut} = perdas de nutriente (kg ha⁻¹); M = Movimentação de solo (Mg ha⁻¹); V_{Nut} = Valor do nutriente na análise química do solo (mg dm⁻³); Ds = densidade do solo (Mg m⁻³).

2.3 Análise Estatística

O estudo como um todo, foi montado em delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subdivididas, onde o fator A na parcela é a declividade e o fator B é o tráfego de forwarder na subparcela, com um total de 14 repetições. Para as análises estatísticas de todo o estudo, as pressuposições de normalidade e homoscedasticidade dos dados foram checadas pelos testes de Kolgomorov e Cochram ($\alpha = 5\%$), respectivamente. Em sequência, foram realizadas análises de variância (ANOVA) e as comparações entre médias pelo teste de Tukey ($\alpha = 5\%$). Para o processamento dos dados foi utilizado o programa STATISTICA 12.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade do Solo (Ds)

Os resultados das análises de densidade do solo (Figura 5) mostram valores maiores nas áreas trafegadas pelo forwarder em comparação com as áreas não trafegadas, independente da classe de declividade avaliada e da região. Entre as classes de declividade as maiores densidades foram observadas na classe de 0-17°, seguido da classe 17-27° e da classe 27-35°, tanto para Região Baixa (RB) quanto para a Região Alta (RA).

A RB apresentou maiores valores de densidade em relação a RA, o que pode ser explicado com base na análise mineralógica realizada durante o levantamento de solos dessas áreas (informação cedida pela empresa), em que a RB apresentou predominantemente argila com mineral do tipo caulinita e a RA apresentou argila com mineral do tipo gibbsita, e conforme apresentado por FERREIRA et al, (1999) solos caulínicos apresentam naturalmente densidades maiores que solos gibbsíticos.

Na classe de declividade 0-17°, em área CT, obteve-se um incremento na Ds de 15,3% para a RB e 12,9% para a RA, quando comparado com a área ST, atingindo valores de 1,43 gcm⁻³ e 1,29 gcm⁻³, respectivamente. Para a classe de declividade de 17-27° ocorreu um incremento de 11,86% para RB e de 14,92% para RA quando comparadas a área CT em relação a área ST. Para a classe de 27-35° foi observado um incremento de 5,41% na RB e de 31,4% na RA. Na classe de 27-35° foram observados os menores valores absolutos de densidade para as duas regiões em estudo.

Em termos de média geral para RB ocorreu incremento na Ds de 10,86% e para RA de 19,75% na Ds após o tráfego do forwarder. De acordo com Departamento de Agricultura Americano (1998) e Geist *et al* (1989) citados por SEIXAS (1997), incrementos maiores que 15% nos valores da densidade natural de um solo podem ser considerados dificultadores para o desenvolvimento de raízes.

Para solos argilosos, valores absolutos de Ds maiores que 1,25 g cm⁻³ já são considerados dificultadores para o desenvolvimento de raízes (REICHERT *et al.*, 2009). Observando os resultados, esse valor não foi ultrapassado após o tráfego do forwarder apenas na classe de declividade de 27-35° e isso provavelmente ocorreu porque a Ds inicial, antes do

tráfego, apresentava valores menores que nas outras classes, situação que pode ser explicada pelo fato da área não ter nenhum histórico de mecanização de colheita, mas que poderá ser atingido à medida que essas áreas forem colhidas em rotações futuras.

Os resultados também demonstram que mesmo nas áreas não trafegadas pelo Forwarder já existia uma diferença significativa na Ds entre as classes de declividade, principalmente em relação as classes de 0-17° e 17-27° comparada a classe 27-35°. Esse gradiente entre as classes declividade pode estar relacionado ao histórico de manejo das áreas.

Na classe de declividade de 0-17°, nas rotações anteriores, a colheita foi realizada de forma mecanizada, assim como as atividades silviculturais. Já na classe de 17-27° apenas as atividades de colheita eram realizadas de forma mecanizada, e na classe de 27-35° foi a primeira vez que a colheita ocorreu de forma mecanizada, o que indica que pode estar ocorrendo um efeito negativo acumulativo na densidade do solo, em função da mecanização das áreas, corroborando com o observado por JESUS et al. (2015), que afirma que os efeitos do tráfego do forwarder da colheita da rotação anterior perduram até o final da rotação seguinte. Outro ponto que pode explicar essa diferença da Ds entre as classes de declividade antes da colheita é o próprio fator intrínseco de formação de solo para cada classe de declividade e posição na paisagem.

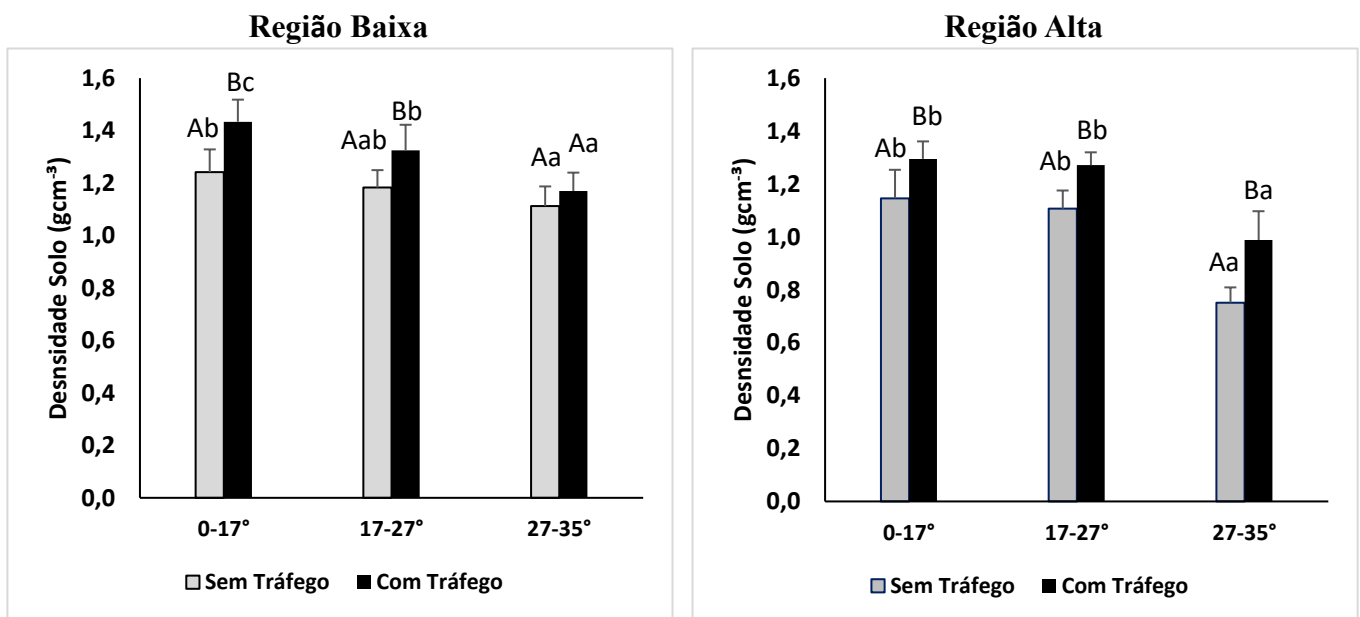


Figura 5. Densidade do solo para a camada de 10 a 20 cm de profundidade. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA). Letras maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declive e minúsculas avaliam

o efeito de classe de declive em cada condição de tráfego pelo teste de Tukey a 5% de significância.

3.2 Porosidade - Total (PT), Macro (Ma) e Micro (Mi)

A Pt de maneira geral foi afetada pelo tráfego do forwarder, apresentando uma redução nos valores absolutos para todas as classes de declividade, nas duas regiões de estudo, para as áreas CT de máquina em relação às áreas ST (Figura 6). Foram observados, para a RB, reduções da Pt de -11,5%, -5,5% e -3,51% para as classes 0-17°, 17-27°, 27-35°, respectivamente, e para a RA reduções de -8,9%, -12,5%, e -13%, respectivamente.

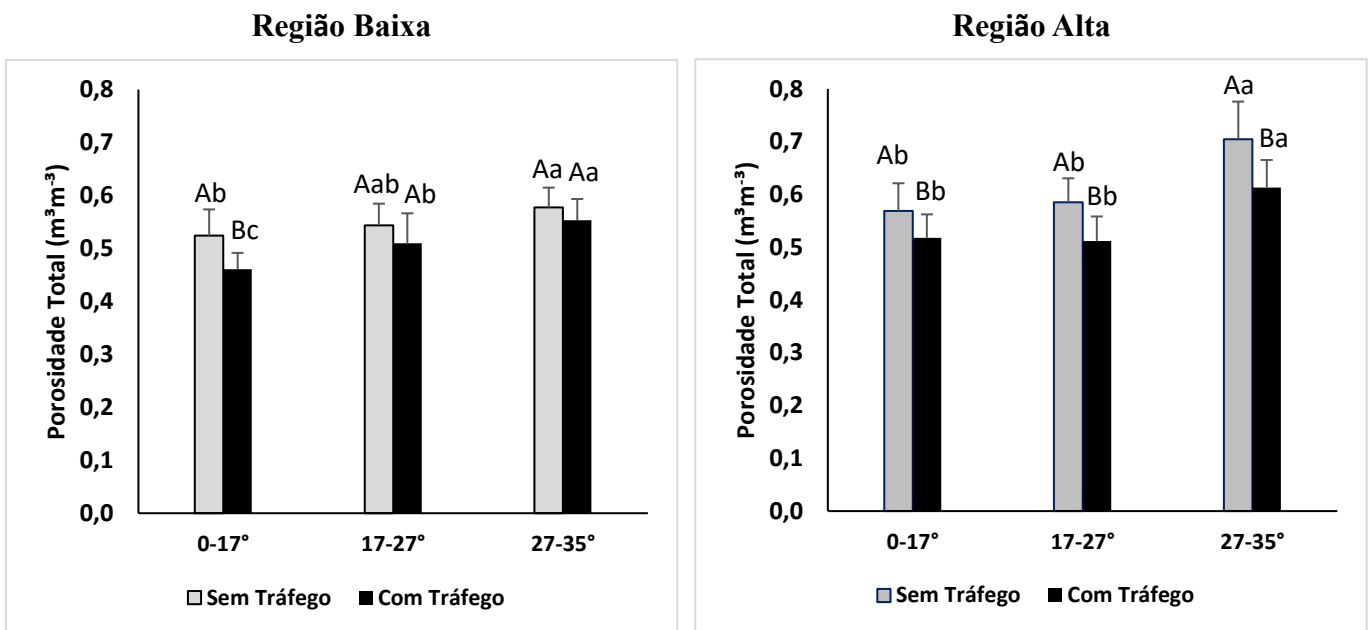


Figura 6. Porosidade Total para a camada de 10 a 20 cm de profundidade. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA). Letras maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declive e minúsculas avaliam o efeito de classe de declive em cada condição de tráfego pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A microporosidade (Figura 07) e a macroporosidade (Figura 08) também foram diretamente afetadas pelo tráfego do forwarder. Ocorreu aumento significativo da microporosidade, e redução, também significativa, da macroporosidade de maneira geral. Na classe de 0-17° da RB, ocorreu um aumento relativo de 22,8% da microporosidade na linha de tráfego das máquinas, já na classe de 17-27° o aumento foi de 21,6% enquanto na classe de 27-

35° foi de 13,7%. Da mesma forma, para RA ocorreram aumentos em todas as classes avaliadas, na classe de 0-17° o aumento foi de 13,4%, na classe de 17-27° foi de 20,1% e na classe 27-35° foi de 29,53%.

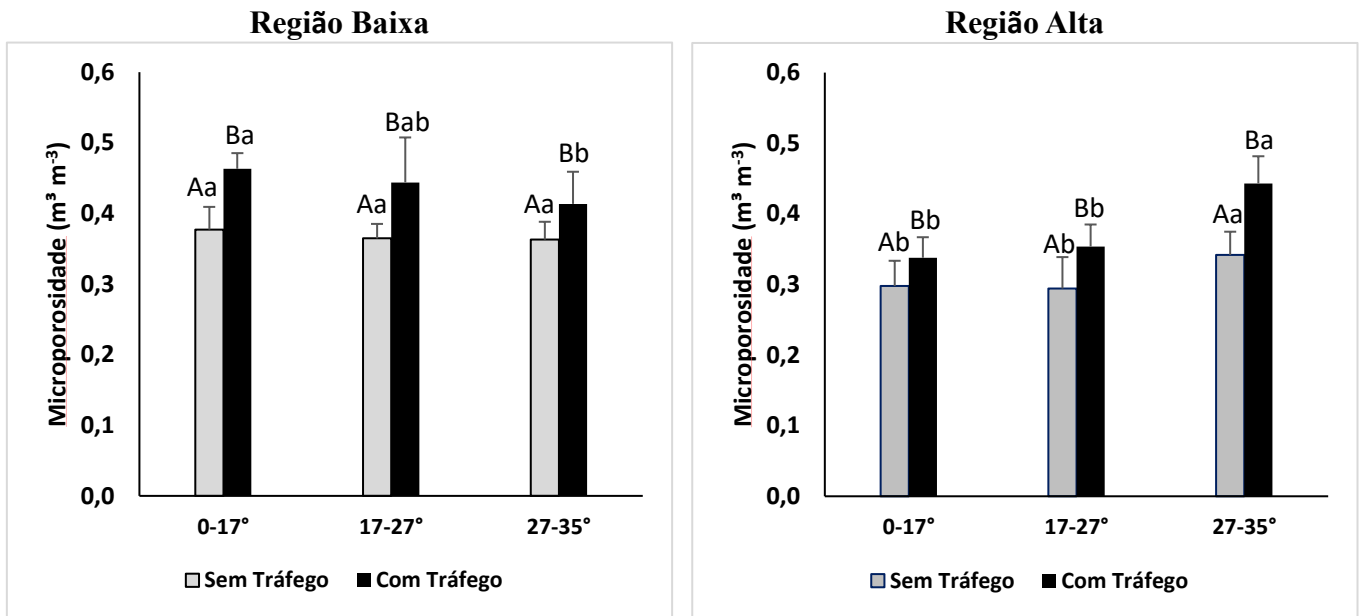


Figura 7. Microporosidade do solo para a camada de 10 a 20 cm de profundidade. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA). Letras maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declive e minúsculas avaliam o efeito de classe de declive em cada condição de tráfego pelo teste de Tukey a 5% de significância.

As alterações na macroporosidade causadas pelo tráfego de forwarder foram relativamente maiores na RB chegando a reduzir 75% na classe de 0-17°, 54,7% na classe de 17-27° e 35,05% na classe de 27-35°. Já para RA as reduções foram relativamente menores, mas ainda assim significativas e de grande magnitude com valores de 33,58%, 41,58%, 56,47% para as classes de 0-17°, 17-27° e 27-35°, respectivamente.

Foram observados, nas áreas da RB trafegadas pelo forwarder, valores menores que 0,1 m³m⁻³ de Ma para as classes de declividade de 0-17° e 17-27°, os quais já são considerados valores impactantes para o bom desenvolvimento de plantas (LIPIEC; HATANO, 2003).

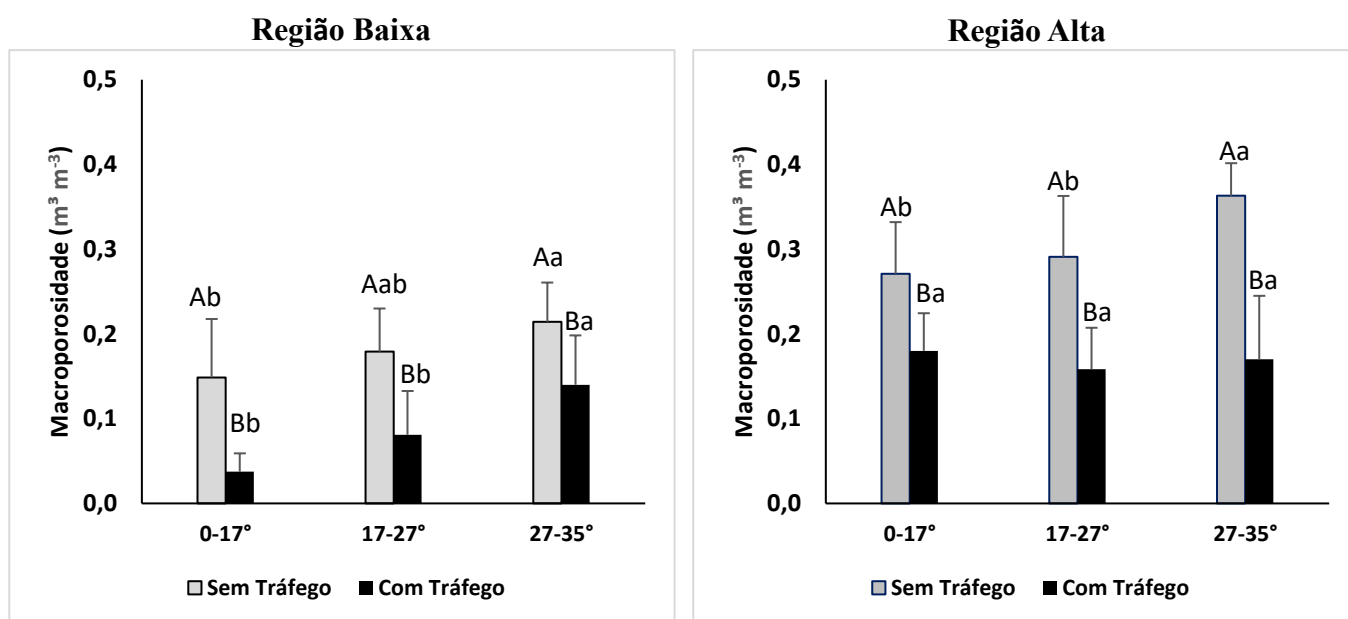


Figura 8. Macroporosidade do solo para a camada de 10 a 20 cm de profundidade. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA). Letras maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declive e minúsculas avaliam o efeito de classe de declive em cada condição de tráfego pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Essa dinâmica de variação na porosidade do solo demonstra de forma clara o quanto a realização da atividade de colheita é capaz de influenciar a estrutura do solo nas áreas trafegadas do forwarder. Ficou evidenciado que a redução na Pt ocorreu pela redução maior da Ma em relação ao aumento da Mi, ou seja, pode ter ocorrido uma transformação de macroporos em microporos, fazendo diminuir a porosidade total. Isso poderá estar diretamente ligado a uma redução na capacidade de drenagem dos solos, aumentando o risco de escoamento superficial e consequentemente a ocorrência de processos erosivos, podendo ser ainda mais impactante nas classes mais declivosas.

3.3 Resistência do Solo à Penetração (RSP)

A resistência do solo a penetração (RSP) na profundidade de 10-20 cm apresentou diferenças significativas dentro de cada classe de declividade para as duas regiões, e evidenciou o efeito do tráfego do forwarder no solo (Figura 09). Os resultados de umidade do solo no momento da avaliação RSP na camada 10-20 cm (Tabela 3) não apresentaram diferença significativa entre as áreas a CT versus as áreas ST, e entre as classes de declividade, apenas

para a classe 27-35° da RA apresentou umidade maior que as demais classes, fato que deve ser considerado durante as análises.

A RB apresentou maiores valores de RSP em relação a RA. Na classe de declividade 0-17° ocorreu incremento de 63%, partindo de 4,4 MPa da área ST para 7,3 MPa de resistência na área CT. Resultado semelhante observado para a classe de 17-27° onde o incremento foi de 66%, partindo de 4,5 MPa da área ST para 7,6 MPa da área CT. Já para a classe de 27-35°, o aumento da RSP também foi significativo, porém menor, de 33,6% saindo de 3,2 MPa para 4,3 MPa de resistência. Jesus et al. (2015) também encontrou valores próximos a 7 MPa de RSP em diferentes situações de tráfego de forwarder, em solos argilosos para profundidade de 10 a 20 cm.

Para a RA também ocorreram incrementos significativos na RSP dentro de cada classe de declividade, porém apresentando valores absolutos menores que na RB. Na classe 0-17° o aumento da RSP foi de 41,1%, partindo de 2,6 MPa para 3,7 MPa, na classe 17-27° foi de 90,6%, saindo 1,79 MPa para 3,4 MPa, já para a classe de 27-35° o aumento foi de 44,1%, partindo de 1,4 MPa na área ST para 2,0 MPa na área CT.

Valores de RSP entre 2 e 3 MPa são considerados restritivos para o crescimento de raízes. Em trabalho desenvolvido em solos arenosos, com quatro espécies arbóreas, foi observado que cerca de 90% das raízes se desenvolveram em solos com RSP menor que 3 MPa e 70% das raízes estavam em áreas com RSP menor que 2 MPa (SINNETT *et al.*, 2008), demonstrando que uma proporção muito menor das raízes consegue se desenvolver em solos com valores maiores de RSP. Os resultados obtidos nesse trabalho, em todas as classes de declividade e nas duas regiões, demonstraram a necessidade da realização de algum preparo de solo após atividade de colheita, para romper a camada com resistência à penetração acima de 2 MPa conforme já proposto por GONÇALVES *et al.*, (2017).

Tabela 3. Umidade gravimétrica do solo para a camada 10-20cm.

Região	Classe Declividade (°)	Umidade Gravimétrica (g g ⁻¹)	
		ST	CT
Baixa	0-17	0,19 aA	0,21aA
	17-27	0,21 aA	0,21aA
	27-35	0,19 aA	0,21aA
Alta	0-17	0,08 aA	0,08aA
	17-27	0,07 aA	0,08aA
	27-35	0,13 bA	0,14bA

Letras minúsculas avaliam o efeito de classe de declividade em cada condição de tráfego e as maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declividade pelo teste de Tukey a 5% de significância dentro de cada região.

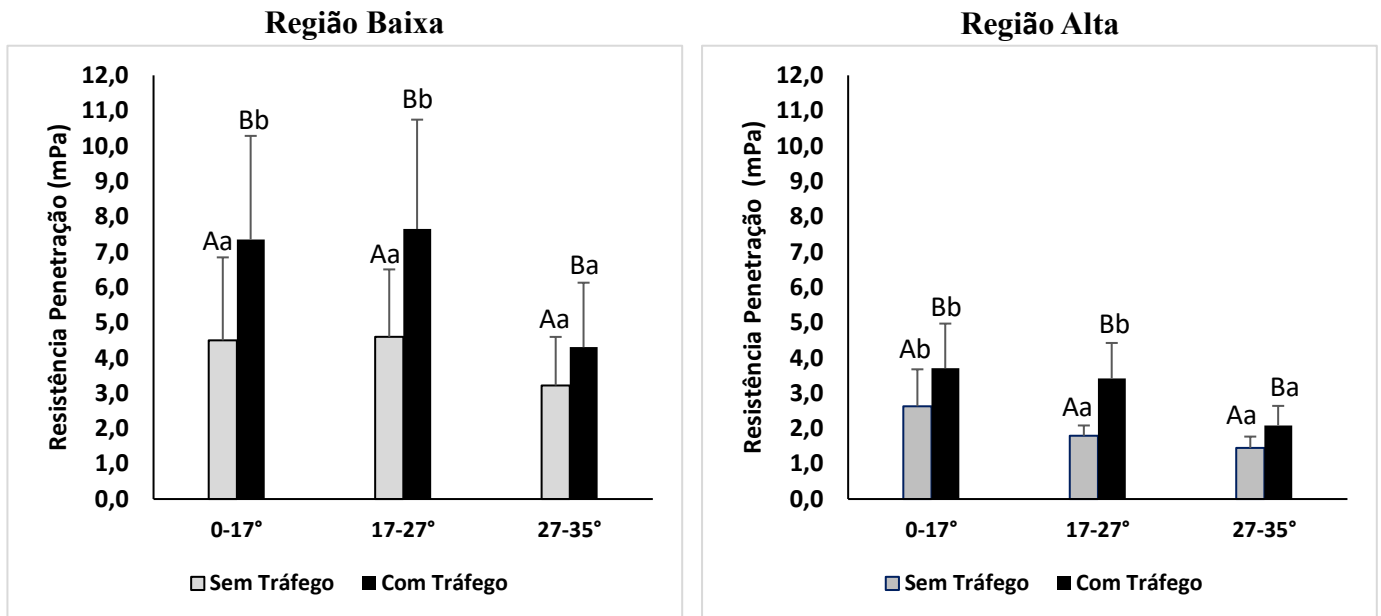


Figura 9. Resistência do solo a penetração para a camada de 10 a 20 cm de profundidade. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA). Letras maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declive e minúsculas avaliam o efeito de classe de declive em cada condição de tráfego pelo teste de Tukey a 5% de significância.

3.4 Índice S

O Índice S é um indicador da qualidade física do solo proposto por DEXTER (2004b) e quanto maior o seu valor melhor. Através dele foi possível identificar o efeito significativo do tráfego do forwarder sobre a qualidade física do solo (Figura 10). É possível observar a perda de qualidade física quando se comparam os resultados das áreas CT com as ST. O índice S dos solos da RA apresentaram qualidade física melhor que os da RB em todas as classes de declive, pois apresentaram os maiores valores absolutos.

Constatou-se uma redução de -20,40% do Índice S na classe de declividade 0-17° para a RB entre as áreas ST e CT, para a classe de 17-27° a redução foi de -25,4% e para a classe 27-35° a redução foi de -22,9%. Já para a RA a redução na classe 0-17° foi de -12,0%, para a classe de 17-27° foi de -25,6% e de -22,6% para a classe de 27-35°.

Dexter (2004) sugeriu que solos, cujo resultado do índice S for abaixo de 0,035, são considerados solos de qualidade física pobre. Para Andrade e Stone (2009), após correlacionarem o resultado do índice S de 2364 amostras de solo com a densidade, macroporosidade e porosidade total e levando em consideração as classes texturais chegaram à conclusão que o limite do índice S, entre solos de qualidade estrutural e solo com tendência a degradação é de 0,045.

Considerando o valor de 0,045 como referência, observou-se que as áreas com tráfego de forwarder da RB, nas classes de 0-17° e 17-27°, apresentaram valores abaixo desse valor, 0,039 e 0,041, respectivamente, indicando que nessas condições o solo já pode ser classificado como fisicamente pobre. O impacto para o desenvolvimento de plantas deverá ser maior nessas condições.

OLIVEIRA (2010) relacionou o Índice S com a produtividade de plantios de eucalipto dos solos da Região do Vale do Rio Doce em Minas Gerais, e como conclusão propôs novas faixas de valores de índice S baseado na produtividade dos plantios aos 7 anos. Nessa classificação proposta, valores de Índice S menores que 0,0387 apresentaram redução de até 10% da produtividade potencial dos plantios e foram classificados como qualidade física regular. Diante dessa informação, comparando com resultados deste trabalho, pode-se observar que para áreas CT das classes de 0 a 17° e 17-27° os valores de Índice S obtidos 0,039 e 0,041,

respectivamente, ficaram bem próximos do limite inferior, o que provavelmente já levaria uma influência negativa na produtividade dessas áreas, caso nenhuma atividade de recuperação da área for realizada após o tráfego do forwarder.

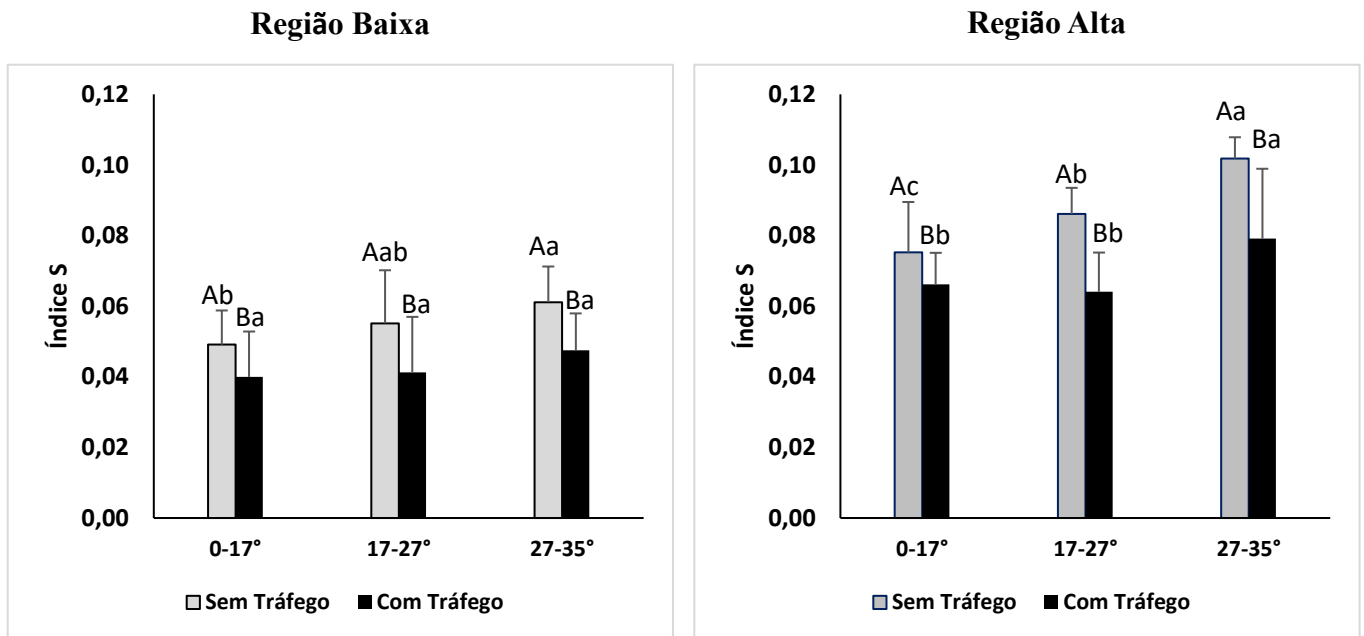


Figura 10. Índice S do solo para a camada de 10 a 20 cm de profundidade. O gráfico da esquerda é referente a região baixa (RB) e o gráfico da direita é referente a região alta (RA). Letras maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declive e minúsculas avaliam o efeito de classe de declive em cada condição de tráfego pelo teste de Tukey a 5% de significância.

3.5 Movimentação de solo, nutrientes e carbono orgânico pelo método pinos de erosão

Por meio dos dados de análise química do solo demonstrados na tabela 4, foram calculados os resultados da movimentação de solo apresentados na tabela 5. Os resultados demonstram que para a RB, na classe de 0-17°, ocorreu movimentação de 80,4 Mg ha⁻¹ de solo nas áreas CT, resultado semelhante observado para as áreas sem ST que foi de 82,1 Mg ha⁻¹, sem diferença estatisticamente significativa. Isso demonstra que para a classe de 0-17° o tráfego do forwarder não causou efeito adicional na movimentação de solo.

Na classe de 17-27° ocorreu movimentação de 140,2 Mg ha⁻¹ nas áreas CT e 105,9 Mg ha⁻¹ nas áreas ST, apesar da relativa diferença numérica não ser significativa, houve tendência maior de movimentação de solo nas áreas CT.

Para a classe de 27-35° ocorreu movimentação de 220,3 Mg ha⁻¹ nas áreas CT versus 131,6 Mg ha⁻¹ das áreas ST, havendo diferença estatisticamente significativa, o que demonstra que para a classe mais declivosa o efeito do tráfego do forwarder foi mais impactante sobre a movimentação de solo.

Para a RA na classe de 0-17° nas áreas CT ocorreu movimentação de 72,9 Mg ha⁻¹ de solo versus 66,2 Mg ha⁻¹ das áreas ST, sem diferença significativa, demonstrando que o tráfego do forwarder também não teve efeito adicional.

Na classe de 17-27° as áreas CT apresentaram movimentação de 166,4 Mg ha⁻¹ contra 102,9 Mg ha⁻¹ das áreas ST, nesse caso havendo diferença significativa entre esses valores.

Na classe de 27-35°, a movimentação de solo foi de 143,5 Mg ha⁻¹ para áreas CT versus 68,9 Mg ha⁻¹ das áreas ST, valores que diferem estatisticamente, apresentando mais que o dobro de movimentação de solo, reforçando que o tráfego de forwarder nessa classe declividade é mais impactante, assim como também foi observado para RB.

Para a RB, analisando as áreas ST, foi observado diferença significativa na movimentação do solo entre as classes de declividade 17-27° e 27-35° em relação a classe de 0-17°, demonstrando que mesmo em áreas sem tráfego do forwarder, para as duas classes de declividade maiores, a movimentação de solo também foi maior. Um dos fatores que podem ter contribuído com isso é o fato de serem solos classificados como Cambissolos, e de acordo com o trabalho desenvolvido por (SILVA, A. M. *et al.*, 2005), onde encontrou perdas de até 205 Mg ha⁻¹ em Cambissolo háplico, concluiu que essa classe de solo é mais sensível às perdas de solo que os Latossolos.

Para a RA, nas áreas ST, não houve diferenças significativas entre as classes de declividade, o que pode estar relacionado ao fator matéria orgânica do solo. Conforme os resultados das análises químicas, apresentados na Tabela 4, a RA apresenta maiores valores de carbono orgânico total (COT) em relação a RB, isso pode favorecer uma maior agregação natural do solo contribuindo para uma melhor estrutura, o que provavelmente explica os valores de movimentação semelhantes, independente da classe de declividade na RA.

Comparando as áreas CT na RB, foi observado uma diferença significativa crescente entre as três classes 0-17°, 17-27° e 27-35° com seguintes valores 80,4, 140,2 e 220,3 Mg ha⁻¹, respectivamente, sendo a classe de 27-35° com o pior resultado.

Já na RA os resultados apresentados foram 72,9, 166,4 e 143,5 Mg ha⁻¹, pode-se observar que o resultado da classe de 0-17° foi o menor e apresentou diferença significativa em relação as outras classes. Porém, entre a classe 17-27° e 27-35° não foi observado diferença

significativa, e contrariando o esperado inicialmente, a classe de 17-27° apresentou valores absolutos de movimentação de solo um pouco maior que a classe 27-35°. Além do fato de ser uma área com declividade intermediária, outro fator que pode ter contribuído foi o maior comprimento de rampa da área de 17-27° que foi de 85 m versus 65 m da classe de 27-35°. O comprimento de rampa e a declividade influenciam diretamente nas taxas de erosão e nesse caso, o fator comprimento de rampa da classe 17-27° pode ter sido mais determinante para a movimentação de solo que a declividade da classe 27-35° (ALBUQUERQUE *et al.*, 2005).

Em resumo, a diferença percentual a maior de movimentação de solo entre as áreas CT e ST, considerando as duas regiões, dentro das classes de 0-17°, 17-27° e 27-35° foi de +3,9%, +47,1% e +87,8%, respectivamente. Demonstrando que para o indicador movimentação de solo, quanto maior a declividade maior o efeito que o tráfego do forwarder causa na movimentação de solo. Resultado coerente com o trabalho realizado por GARREN *et al.* (2019), onde foi calculado as taxas potenciais de erosão de áreas com declividade entre 27 a 38° colhidas em sistema de toras curtas por meio da Equação Universal de Perda de Solo e que indicou maiores estimativas de perdas do solo nas linhas de tráfego do forwarder.

Quando se comparam os valores de solo movimentado encontrados neste trabalho com trabalhos publicados, em relação a valores de referência toleráveis de perda de solo, observou-se uma variabilidade de valores, que dependem do método utilizado, do tipo de solo, do período que foi avaliado, da declividade analisada, entre outros fatores. E para as classes de declividade deste trabalho são raros os trabalhos realizados.

SILVA *et al.* (2011) avaliou perdas de solos em áreas de cultivo de eucalipto na região do Vale do Rio Doce em Minas Gerais, por um período de 6 anos através do método da parcela padrão, para um Latossolo vermelho e outro Latossolo vermelho amarelo em declividades de 11° a 25°, encontrou valores de perdas de solo de 0,0305 e 0,0581 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em áreas de plantio, chegando a 17,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em áreas de solo descoberto. São valores baixos, porém ao se detalhar a metodologia foi observado que não foi avaliado no primeiro ano de cultivo, e segundo OLIVEIRA *et al.* (2013) é o período que se ocorre as maiores perdas de solo.

Utilizando o método dos pinos de erosão, em cambissolo em situação de solo descoberto RIOS, (2019) encontrou valores de perda de solo de 189,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. JULIAN, (2022) em Neossolo quartzarênico encontrou valores de 207,13 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ também utilizando o método dos pinos de erosão.

SILVA *et al.* (2005) encontrou valores médio de perdas de solo de 205,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em cambissolo háplico argiloso, para um período de 5 anos de monitoramento utilizando o

método de parcela padrão, em área com solo descoberto e em uma declividade 9,4°. No primeiro ano do monitoramento o valor chegou a 374,1 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

De maneira geral os resultados de movimentação de solo encontrados, são considerados valores altos para todas as classes de declive, quando comparados com outros estudos.

Em relação a estimativa de perda de nutrientes e de carbono orgânico, os resultados dependeram do total de solo movimentado calculado para cada classe de declividade, tipo tráfego e da quantidade de cada elemento que estava presente no solo avaliado.

Os valores obtidos foram consideráveis, para RB, nas áreas CT, ocorreu uma perda média estimada de 1229,5 kg/ha de COT, 0,84 kg/ha de P, 6,6 kg/ha de K, 55,8 kg/ha de Ca e 6,2 kg/ha de Mg versus uma perda média nas áreas ST de 987,5 kg/ha de COT, 0,41 kg/ha de P, 4,5 kg/ha de K, 27,4 kg/ha de Ca e 3,7 kg/ha de Mg. A diferença em percentual da estimativa de perdas entre áreas CT e ST foi de +24,5%, +104,9%, +46,7%, +103,6% e 67,6% para COT, K, P, Ca e Mg, respectivamente.

Para a RA, perda média foi de 2621,0 kg/ha de COT, 0,41 de P, 2,8 de K, 9,8 de Ca e 2,8 de Mg versus uma perda média nas áreas ST de 1841 kg/ha de COT, 0,37 de P, 1,6 de K, 3,4 de Ca e 1,1 de Mg. A diferença em percentual da estimativa de perdas entre áreas CT e ST foi de +42,4%, +10,8%, +75,0%, +188,2% e +154,5%. Esses valores são relevantes e devem ser considerados nas recomendações de adubação.

Considerando as duas áreas, em ordem decrescente de grandeza, as maiores perdas quantificadas foram de COT > Ca > K > Mg > P.

O impacto da colheita foi perceptível e estes resultados demonstram a necessidade, de trabalhos mais específicos para melhorar as estratégias de conservação e adequação de manejo para prevenir processos erosivos e garantir a sustentabilidade cultivo florestal em áreas declivosas.

Tabela 4. Resultado das análises químicas das duas regiões de estudo, em amostras coletadas nas áreas com tráfego (CT) e sem tráfego (ST) de forwarder em diferentes classes de declividade (0-17°, 17-27°, 27-35°) na profundidade (0-10 cm).

Região	Local da Coleta	Classe Declividade	pH	COT (dag dm ⁻³)	P ----- mg dm ⁻³ -----	K ----- mg dm ⁻³ -----	Ca ----- cmol _c dm ⁻³ -----	Mg ----- cmol _c dm ⁻³ -----	H++Al	V %
Baixa	Sem Tráfego	0-17	5,60 (±0,61)	1,18 (±0,30)	6,10 (±3,39)	78,68 (±28,67)	3,37 (±1,93)	0,61 (±0,28)	2,67 (±0,96)	58,42 (±18,71)
		17-27	5,08 (±0,66)	1,13 (±0,15)	4,37 (±3,55)	47,55 (±19,82)	1,36 (±1,52)	0,33 (±0,16)	4,42 (±1,43)	27,85 (±18,63)
		27-35	4,35 (±0,36)	0,97 (±0,18)	3,73 (±2,60)	34,27 (±14,56)	0,51 (±0,41)	0,17 (±0,10)	5,86 (±1,66)	12,20 (±8,39)
	Com Tráfego	0-17	5,79 (±0,48)	1,16 (±0,28)	4,51 (±3,04)	102,04 (±34,1)	3,45 (±1,96)	0,60 (±0,27)	2,27 (±0,70)	62,82 (±14,41)
		17-27	5,28 (±0,74)	1,21 (±0,39)	5,82 (±3,58)	64,89 (±41,43)	3,18 (±2,62)	0,59 (±0,42)	3,13 (±1,08)	48,30 (±28,51)
		27-35	4,64 (±1,05)	0,91 (±0,17)	8,56 (±3,89)	36,72 (±15,52)	1,57 (±1,48)	0,30 (±0,45)	5,27 (±1,87)	19,68 (±26,76)
Alta	Sem Tráfego	0-17	4,84 (±0,58)	2,23 (±0,63)	2,92 (±1,36)	17,92 (±4,92)	0,09 (±0,08)	0,08 (±0,04)	8,61 (±3,69)	2,65 (±0,89)
		17-27	5,46 (±0,33)	2,30 (±0,49)	7,27 (±4,41)	20,11 (±4,23)	0,37 (±0,40)	0,13 (±0,09)	6,98 (±1,50)	7,66 (±6,37)
		27-35	5,03 (±0,45)	2,27 (±0,67)	2,82 (±1,86)	20,17 (±6,34)	0,13 (±0,35)	0,09 (±0,12)	7,43 (±2,09)	3,50 (±5,05)
	Com Tráfego	0-17	5,30 (±0,92)	2,06 (±0,88)	2,60 (±1,23)	24,05 (±11,75)	0,35 (±0,50)	0,16 (±0,12)	6,89 (±2,75)	7,17 (±4,90)
		17-27	5,61 (±0,54)	2,47 (±0,40)	2,45 (±0,81)	20,95 (±5,01)	0,60 (±0,72)	0,29 (±0,38)	5,29 (±1,61)	33,71 (±25,87)
		27-35	5,03 (±0,29)	2,38 (±0,80)	5,15 (±3,69)	30,22 (±16,52)	0,34 (±0,30)	0,15 (±0,11)	8,29 (±2,89)	6,74 (±4,76)

- pH em água; COT= MO ÷ 1,724 (Walkley Black); P e K (Extrator Mehlich-1); Ca⁺², Mg⁺² e Al³⁺ (extrator KCl - 1 mol L⁻¹); V = (SB/T) x100.

Os valores entre parênteses indicam desvio padrão (n=10).

Tabela 5. Valores de movimentação de solo e estimativa de perdas de nutrientes, calculados pelo método pinos de erosão entre os meses de nov/2021 a mar/2022 para as duas regiões em estudo.

Região	Tráfego Forwarder	Classe Declividade	Declividade Média	Comprimento Rampa	Posição na Paisagem	Mov_Solo	COT	P	K	Ca	Mg	
-	-	°	°	m	-	-----Mg/ha-----	-----Kg/ha-----					
Baixa	Sem Tráfego (ST)	0-17	3,2	150	Baixada	82,1 aA	798,5 aA	0,41 aA	5,3 aA	45,7 cA	4,9 bA	
		17-27	19,8	50	Encosta	105,9 abA	999,4 aA	0,38 aA	4,2 aA	24,1 bA	3,5 abB	
		27-35	31,4	50	Encosta	131,6 bA	1165,5 aA	0,44 aA	4,1 aA	12,3 aA	2,5 aA	
		Média ST	-	-	-	106,5 A	987,5 A	0,41 A	4,5 A	27,4 A	3,7 A	
	Com Tráfego (CT)	0-17	3,2	150	Baixada	80,4 aA	658,5 aA	0,25 aB	5,8 aA	39,3 aA	4,1 aA	
		17-27	19,8	50	Encosta	140,2 bA	1282,0 bA	0,61 bB	6,8 aB	67,5 bB	7,5 bA	
		27-35	31,4	50	Encosta	220,3 cB	1747,5 cB	1,64 cB	7,1 aB	60,5 abB	7,1 bB	
		Média CT	-	-	-	146,9 B	1229,5 B	0,84 B	6,6 B	55,8 B	6,2 B	
	Alta	Sem Tráfego	0-17°	13,6	60	Topo de Morro	66,4 aA	1321,5 aA	0,17 aA	1,1 aA	1,1 aA	0,6 aA
			17-27°	21,1	80	Ecosta	102,9 aA	2168,0 bA	0,68 bA	1,9 abA	6,9 cA	1,5 bA
27-35°			32,0	65	Ecosta	68,9 aA	2033,5 bA	0,25 aA	1,8 aA	2,3 bA	1,0 abA	
Média ST			-	-	-	79,4 A	1841,0 A	0,37 A	1,6 A	3,4 A	1,1 A	
Com Tráfego		0-17°	13,6	60	Topo de Morro	72,9 aA	1159,5 aA	0,14 aA	1,3 aA	3,9 aB	1,1 aB	
		17-27°	21,1	80	Ecosta	166,4 bB	3263,5 bA	0,32 bB	2,7 bA	15,9 cB	4,6 cB	
		27-35°	32,0	65	Ecosta	143,5 bB	3439,5 bB	0,74 cB	4,3 bB	9,8 bB	2,6 bB	
		Média CT	-	-	-	127,6 B	2621,0 B	0,41 A	2,8 B	9,8 B	2,8 B	

- Movimentação de solo e estimativas de perdas de nutrientes. Letras minúsculas avaliam o efeito de classe de declividade em cada condição de tráfego e as maiúsculas comparam o efeito do tráfego em cada classe de declividade pelo teste de Tukey a 5% de significância dentro de cada região.

4. CONCLUSÕES

- 1) O tráfego de máquinas causou efeito negativo na maioria das propriedades físicas avaliadas e na movimentação de solo. A ordem decrescente de relevância por classe de declividade foi: $27-35^\circ > 17-27^\circ > 0-17^\circ$.
- 2) A movimentação de solo é maior nas classes de maior declividade, podendo ser influenciada pelo comprimento de rampa.
- 3) As perdas de nutrientes, com a movimentação de solo, são de valores consideráveis, que devem ser computados no balanço de nutrientes realizado para a recomendação de adubação dos plantios florestais.

5. REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Abel W. de; M. FILHO, Gilson; SANTOS, José R.; COSTA, José P. V.; SOUZA, José L. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 9, nº 2, p. 153–160, jun. 2005. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662005000200001>.
- ALVAREZ V., V.H; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J. A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa-MG: Boletim Informativo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, mar. 2000.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 13, nº 4, p. 382–388, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>. Acessado em: 22 nov. 2022.
- AOAC. **Official methods of analysis of the Associations of Official Analytical Chemists**. 12º ed. Washington: Associations of Official Analytical Chemists , 1975. vol. 1, .
- BONO, J A M; CURI, N; FERREIRA, M M; EVANGELISTA, A R; CARVALHO, M M; SILVA, M L N. Cobertura vegetal e perdas de solo por erosão em diversos sistemas de melhoramento de pastagens nativas*. **Pasturas tropicais**, vol. 18, nº 2, 1996. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113297/1/Vol18-rev2-96-art2.pdf>. Acessado em: 3 fev. 2023.
- BRAGA, J.L; DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, , p. 73–85, 1974. .
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, nº 1, p. 147–157, fev. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>. Acessado em: 6 out. 2022.
- CUNHA, F. L.; NIERI, E. M.; MELO, L. A.; ARAÚJO, T. G.; LEITE, F. P.; VENTURIN, N. Indicadores de qualidade da subsolagem com escavadora hidráulica em áreas declivosas em duas diferentes umidades do solo. **Scientia Forestalis**, vol. 48, nº 128, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.16>. Acessado em: 9 abr. 2022.
- DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, vol. 29, nº 3, p. 383–390, jun. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000300005>. Acessado em: 6 jun. 2022.
- DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo**. Viçosa-MG: [s. n.], 1997. vol. 29, .

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

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; LASMAR JÚNIOR, E.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, vol. 62, n° 3, p. 248–255, jun. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300008>. Acessado em: 21 set. 2022.

DIAS JUNIOR, M. S.; LEITE, F. P.; WINTER, M. E.; PIRES, J. V. G. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. **Revista Árvore**, vol. 27, n° 3, p. 343–349, jun. 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300010>. Acessado em: 6 jan. 2023.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3° ed. Brasília-DF: EMBRAPA, 2017. vol. 1, .

FERREIRA, M. M. Caracterização Física do Solo. *In*: LIER, Q. J. V. (org.). **Física do Solo**. 1ª. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. vol. 1, p. 1–298.

FERREIRA, M M; FERNANDES, B; CURTI, N. INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE LATOSSOLOS DA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, vol. 23, p. 515–524, 1999. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300003>. Acessado em: 7 nov. 2022.

GARREN, Austin M.; BOLDING, M. Chad; AUST, W. Michael; MOURA, Angelo C.; BARRETT, Scott M. Soil Disturbance Effects from Tethered Forwarding on Steep Slopes in Brazilian Eucalyptus Plantations. **Forests**, vol. 10, n° 9, p. 721, 22 ago. 2019. <https://doi.org/10.3390/f10090721>. Acessado em: 16 abr. 2022.

GONÇALVES, J. L. de M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, JL L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. *In*: GONÇALVES, J. L. de M.; BENEDETTI, V. (orgs.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. IPEF. Piracicaba-MG: IPEF, 2000. p. 3–57.

GONÇALVES, S. B.; LOPES, E. S.; FIEDLER, N. C.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; STAHL, J. Resistência do solo a penetração em diferentes profundidades de subsolagem. **Nativa**, vol. 5, n° 3, p. 224–229, 2017. <https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05n03a12>. Acessado em: 19 set. 2022.

IBÁ. **Relatório Anual 2022**. São Paulo: [s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acessado em: 4 fev. 2023.

JESUS, G. L.; SILVA, I. R.; ALMEIDA, L. F. J.; SANTOS, M. A.; LEITE, F. P.; NEVES, J. C. L. PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO, ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E

FRAÇÕES DA MATÉRIA ORGÂNICA INFLUENCIADAS PELA INTENSIDADE DE TRÁFEGO E RESÍDUOS DE COLHEITA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 39, nº 4, p. 1190–1203, 1 ago. 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140494>. Acessado em: 9 maio 2021.

JULIAN, C. ESTIMATIVA DE EROÇÃO UTILIZANDO MÉTODO DIRETO E INDIRETO EM PROPRIEDADE RURAL NO DISTRITO DE AMADEU AMARAL, MUNICÍPIO DE MARÍLIA/SP. 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/217095>. Acessado em: 13 jan. 2023.

KEARNEY, S.P.; FONTE, S.J.; GARCÍA, E.; SMUKLER, S.M. Improving the utility of erosion pins: absolute value of pin height change as an indicator of relative erosion. **CATENA**, vol. 163, p. 427–432, 1 abr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.008>. Acessado em: 6 jan. 2022.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, vol. 116, nº 1–2, p. 107–136, 1 set. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1). Acessado em: 10 nov. 2022.

MALINOVSKI, J. R.; CAMARGO, C. M. S; MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, R. A.; CASTRO, G. P. Sistemas. In: MACHADO, C. C. (org.). **Colheita Florestal**. 3º ed. Viçosa-MG: Editora UFV, 2002. vol. 1, p. 179–205.

MELLO, C. R.; SÁ, Marcos A. C.; CURTI, N.; MELLO, J. M.; VIOLA, M. R.; SILVA, A. M. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 42, nº 4, p. 537–545, abr. 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000400012>. Acessado em: 14 jan. 2023.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, vol. 12, nº 3, p. 513–522, jun. 1976. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.

OLIVEIRA, A. H.; LEANDRO, M.; SILVA, N.; CURTI, N.; AVANZI, J. C.; NETO, G. K.; ARAÚJO, E. F. WATER EROSION IN SOILS UNDER EUCALYPTUS FOREST AS AFFECTED BY DEVELOPMENT STAGES AND MANAGEMENT SYSTEMS. vol. 37, nº 2, p. 159–169, 2013. . Acessado em: 4 fev. 2023.

OLIVEIRA, A. P. **Índice “S” e suas relações com características físicas de solos e com a produtividade de eucalipto**. 2010. 1–48 f. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

REICHERT, J. M.; MORALES, C. A. S.; LIMA, E. M.; DE BASTOS, F.; SAMPIETRO, J. A.; DE ARAÚJO, E. F.; SRINIVASAN, R. Best tillage practices for early-growth of clonal eucalyptus in soils with distinct granulometry, drainage and profile depth. **Soil and Tillage Research**, vol. 212, p. 105038, 1 ago. 2021. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2021.105038>. Acessado em: 18 nov. 2022.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, vol. 102, n° 2, p. 242–254, mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>. Acessado em: 9 out. 2022.

RIOS, Lucas Ferreira. **ANÁLISE ESPACIAL E TEMPORAL DA EROSÃO LAMINAR PELO MÉTODO DOS PINOS**. 2019. 1–72 f. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/34779/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_An%C3%A1lise%20espacial%20e%20temporal%20da%20eros%C3%A3o%20laminar%20pelo%20m%C3%A9todo%20dos%20pinos.pdf. Acessado em: 23 jul. 2021.

RUIZ, Hugo Alberto. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 29, n° 2, p. 297–300, abr. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200015>. Acessado em: 9 jul. 2022.

SANTOS, D.; CURTI, N.; FERREIRA, M.; EVANGELISTA, A. R.; DA, A. B.; FILHO, C. PERDAS DE SOLO E PRODUTIVIDADE DE PASTAGENS NATIVAS MELHORADAS SOB DIFERENTES PRÁTICAS DE MANEJO 1. **EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, vol. 33, n° 2, p. 183–189, 1998. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/45020/1/PERDAS-DE-SOLO-E-PRODUTIVIDADE-DE-PASTAGENS.pdf>. Acessado em: 3 fev. 2023.

SEIXAS, F. Potencial de danos dos sistemas de colheita de madeira no solo e nas cepas. *In*: SEIXAS, F. (org.). **Série Técnica - IPEF**. Piracicaba-SP: IPEF, 1997. vol. 11, p. 63–78. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr30/cap6.pdf>. Acessado em: 6 fev. 2023.

SEKI, K. SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 4, p. 407–437, 2007. Disponível em: <https://hess.copernicus.org/preprints/4/407/2007/hessd-4-407-2007.pdf>. Acessado em: 9 jul. 2022.

SIBCS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5° ed. Brasília-DF: EMBRAPA, 2018. vol. 1, .

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 33, n° 6, p. 1811–1820, dez. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600029>. Acessado em: 10 jan. 2023.

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; LIMA, J. M.; AVANZI, J. C.; FERREIRA, M. M. Perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico em Cambissolo e Latossolo sob chuva natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, vol. 40, n° 12, p. 1223–1230, dez. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001200010>.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; AVANZI, J. C.; LEITE, F. P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, vol. 21, nº 4, p. 765–776, 30 dez. 2011. <https://doi.org/10.5902/198050984520>. Acessado em: 8 ago. 2022.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; PEREIRA, P. R. G. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol. 26, nº 4, p. 1001–1010, dez. 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400018>. Acessado em: 5 jul. 2022.

SINNETT, D.; MORGAN, G.; WILLIAMS, M.; HUTCHINGS, T. R. Soil penetration resistance and tree root development. **Soil Use and Management**, vol. 24, nº 3, p. 273–280, 1 set. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00164.x>. Acessado em: 20 nov. 2022.

SOUZA, C. M.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; A. ALENCAR, A.; RUDORFF, B. F. T.; HASENACK, H. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, vol. 12, nº 17, p. 2735, 25 ago. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Acessado em: 9 nov. 2022.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. An impact penetrometer model to determine the deep tillage in sugar cane areas. **CONGRESS OF THE ISSCT, La Habana**, vol. 1, nº 2, p. 544–550, 1983. Disponível em: [https://www.servidores.ufscar.br/hprubismar/hprubismar_ARTIGOS/23._An_impact_penetro_meter_model_to_determine_the_deep_tillage_in_gugar_cane_areas_\(Stolf,R.\).pdf](https://www.servidores.ufscar.br/hprubismar/hprubismar_ARTIGOS/23._An_impact_penetro_meter_model_to_determine_the_deep_tillage_in_gugar_cane_areas_(Stolf,R.).pdf). Acessado em: 8 jul. 2022.

STOLF, R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F.; ANTONIO, L. A. C. PENETRÔMETRO DE IMPACTO STOLF-PROGRAMA COMPUTACIONAL DE DADOS EM EXCEL-VBA. **Revista Ciência do Solo**, nº 3, p. 774–782, 2014. Disponível em: https://www.servidores.ufscar.br/hprubismar/hprubismar_ARTIGOS/112._PenetrometrodeImpactoStolf-ProgramaComputacionalDeDadosExcel-VBA.pdf. Acessado em: 8 jul. 2022.

USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE). Assessing Soil Quality: Practicable Standards for Sustainable Forest Productivity in the United States. *In*: POWERS, Robert F.; TIARKS, Allan E.; BOYLE, James R. (orgs.). **The Contribution of Soil Science to the Development of and Implementation of Criteria and Indicators of Sustainable Forest Management**. 53^o ed. Davidson, E.A: Soil Science Society of America, 1998. vol. Special Publication, p. 53–80. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub53.c3>. Acessado em: 15 jan. 2023.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, vol. 44, nº 5, p. 892–898, set. 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Acessado em: 6 jun. 2022.

APÊNDICE A – Gráficos de Resistência à Penetração e Umidade do Solo

Figura 11 – Gráficos de resistência à penetração e umidade da Região Baixa nas classes de declividade de 0-17°, 17-27° e 27-35°, profundidade 0-60 cm.

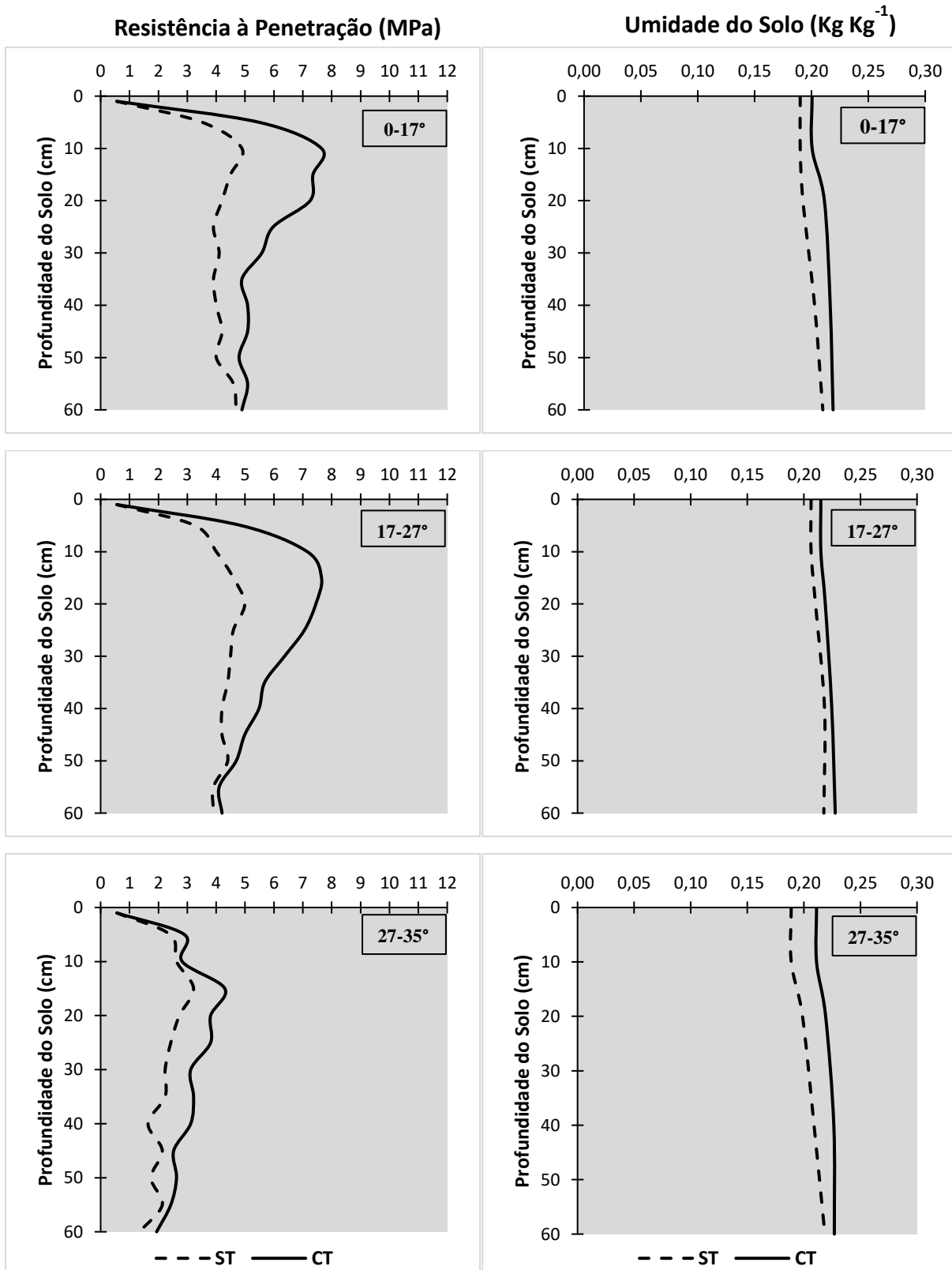
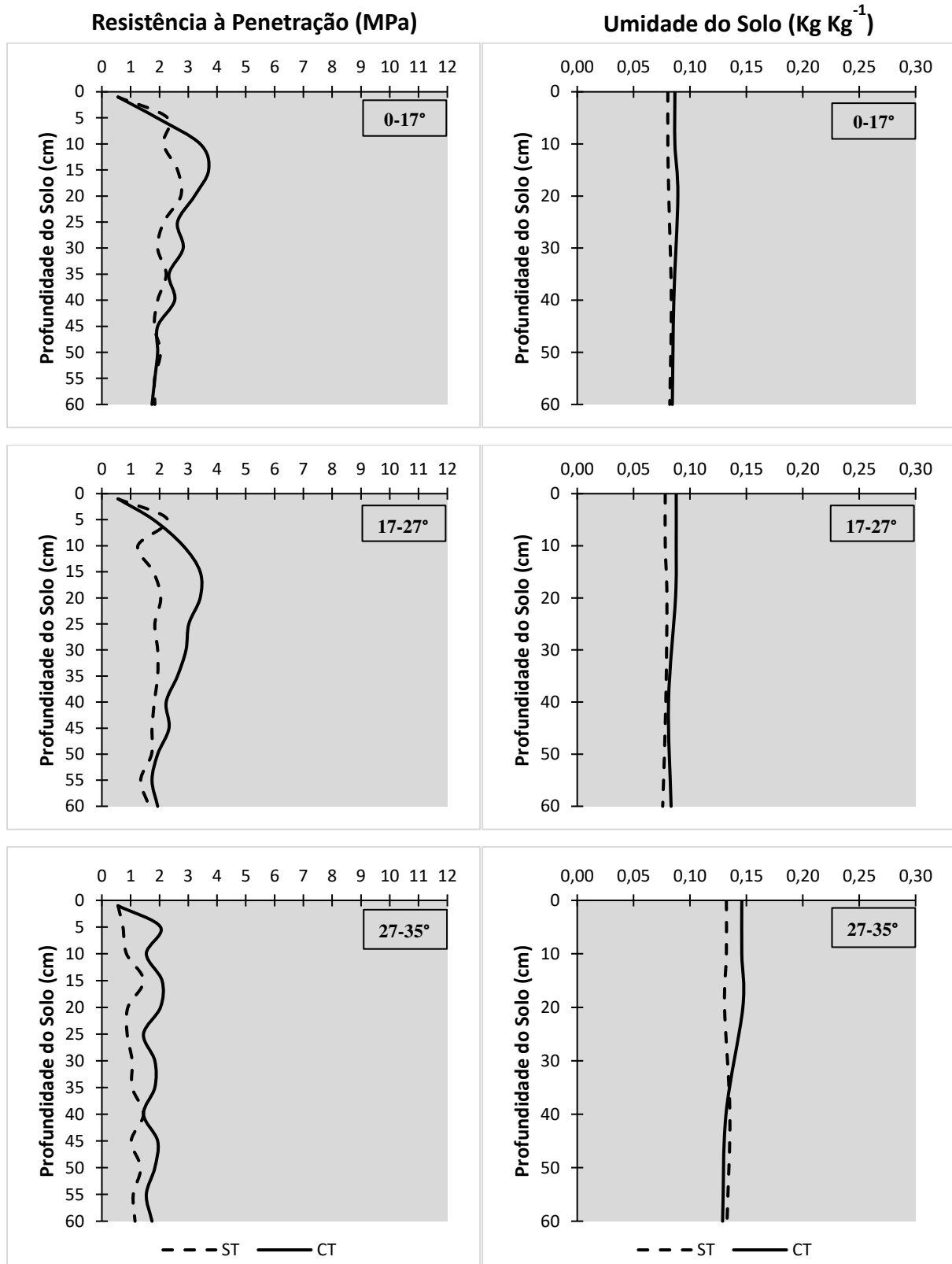


Figura 12 – Gráficos de resistência à penetração e umidade do solo da Região Alta nas classes de declividade de 0-17°, 17-27° e 27-35°, profundidade 0-60 cm.



APÊNDICE B – Curvas de Retenção de Água no Solo

Figura 13 – Curvas de retenção de água no solo nas classes de declividade de 0-17°, 17-27° e 27-35° para as duas regiões, em amostras coletadas na profundidade de 10-20 cm.

