

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Jânio dos Santos Barbosa

**RESISTÊNCIA FÍSICO-MECÂNICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB COLHEITA FLORESTAL DE *Eucalyptus dunnii***

Santa Maria, RS, Brasil

2020

**Jânio dos Santos Barbosa**

**RESISTÊNCIA FÍSICO-MECÂNICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB COLHEITA FLORESTAL DE *Eucalyptus dunnii***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. José Miguel Reichert

Santa Maria, RS

2020

Barbosa, Jânio dos Santos  
RESISTÊNCIA FÍSICO-MECÂNICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO  
AMARELO SOB COLHEITA FLORESTAL DE *Eucalyptus dunnii* / Jânio  
dos Santos Barbosa.- 2020.  
65 p.; 30 cm

Orientador: José Miguel Reichert  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro  
de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal,  
RS, 2020

1. solo florestal 2. compressibilidade do solo 3. qualidade estrutural  
do solo 4. floresta plantada I. Reichert, José Miguel II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo  
autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central.  
Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

© 2020 Todos os direitos autorais reservados a Jânio dos Santos Barbosa. A  
reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a  
citação da fonte. E-mail: janio.jsb@gmail.com

---

Jânio dos Santos Barbosa

**RESISTÊNCIA FÍSICO-MECÂNICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB COLHEITA FLORESTAL DE *Eucalyptus dunnii***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

**Aprovado em 20 de fevereiro de 2020:**



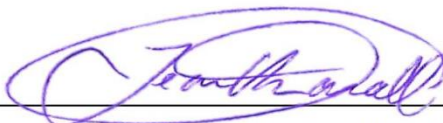
---

**José Miguel Reichert, Dr. (UFSM) – Videoconferência**  
(Presidente/Orientador)



---

**Carla Eloize Carducci, Dra. (UFGD) – Videoconferência**



---

**Jean Pierri Cavali, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por até aqui ter me ajudado e pela sua infinita bondade sobre minha vida.

Aos meus pais Cícero Barbosa e Zenilda Barbosa, minha irmã Geovânia Moura e sobrinha Ana Beatriz, pelo apoio e incentivo em buscar “as melhoras pra vida”.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal e a Capes, pelo incentivo da bolsa.

À CMPC Celulose Riograndense, na pessoa do pesquisador Elias Frank de Araújo, pelo apoio e interesse na pesquisa.

Ao professor orientador José Miguel Reichert.

Às amigadas construídas no ambiente de trabalho e na cidade de Santa Maria.

E a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação profissional e a concretização deste estudo.

Mais um ciclo se finaliza, com a sensação de que tudo foi feito dentro das possibilidades existentes.

Histórias foram escritas e novas histórias virão!

*Porque os meus pensamentos não são os vossos pensamentos, nem os vossos caminhos, os meus caminhos, diz o Senhor. (Isaias 55.8)*

## RESUMO

# RESISTÊNCIA FÍSICO-MECÂNICA DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB COLHEITA FLORESTAL DE *Eucalyptus dunnii*

AUTOR: Jânio dos Santos Barbosa  
ORIENTADOR: José Miguel Reichert

Com o aumento significativo na produtividade dos sítios florestais, torna-se fundamental a implementação de técnicas que visem ao equilíbrio entre as altas taxas produtivas das culturas e a resiliência do sistema solo, para minimizar os impactos originados da compactação resultante da colheita florestal. Este trabalho objetivou avaliar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas colhedoras de madeira (*Harvester* e *Forwarder*) sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo franco-areno-argiloso, com e sem aporte da biomassa residual da colheita de eucalipto. O estudo foi realizado em povoamentos comerciais de *Eucalyptus dunnii*, com os tratamentos de diferentes intensidades de tráfego, sendo: T (testemunha), H (uma passada de *Harvester*), H2F, H4F, H8F e H16F que consistiram em uma passada de *Harvester* mais a sequência de duas, quatro, oito e dezesseis passadas do *Forwarder*, respectivamente, onde os três últimos tratamentos compõem a etapa de extração de madeira, com presença ou ausência da biomassa residual. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com três repetições. As coletas de amostras de solo, com estrutura preservada em anéis volumétricos, foram realizadas nas camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Foram avaliados: (i) o efeito das máquinas sobre o solo/resíduo da colheita: área de contato dos pneus, pressão das máquinas sobre o solo e camada de resíduos; (ii) as propriedades de composição do solo: densidade do solo (Ds), porosidade total, macroporosidade, microporosidade, distribuição tamanho de poros, armazenamento de água; e (iii) as propriedades de funcionalidade: permeabilidade do solo ao ar, condutividade hidráulica do solo saturado, pressão de preconsolidação e resistência do solo à penetração no campo. Ao associar as propriedades de composição com as propriedades de funcionalidade do solo, observou-se que a compressão causada pelo número de passadas das máquinas pode ser benéfica em solos mais arenosos, por modificar o sistema poroso, incrementando o volume de poros responsáveis pelo armazenamento de água em profundidade. O limite de passadas do *Forwarder* numa mesma linha dependerá da profundidade considerada, sendo limitadas a duas e quatro passadas na presença de resíduos de colheita e de apenas duas passadas na ausência de resíduos.

**Palavras-chave:** solo florestal, compressibilidade do solo, qualidade estrutural do solo, floresta plantada.

## ABSTRACT

### PHYSICAL-MECHANICAL STRENGTH OF ULTISOL UNDER *Eucalyptus dunnii* FOREST HARVEST

AUTHOR: Jânio dos Santos Barbosa

ADVISOR: José Miguel Reichert

With the significant increase in the productivity of forest sites, it is essential to implement techniques that aim to balance high crop yields and soil resilience, to minimize the impacts caused by compaction resulting from forest harvesting. This study aimed to evaluate the effects of the traffic intensity of wood harvesting machines (harvester and forwarder) on a loamy sandy clay Ultisol, with and without presence of the residual biomass from the eucalyptus harvest. The study was carried out in a commercial stands of *Eucalyptus dunnii*, with the following treatments of different traffic intensities, being: C (control without any traffic), H (one Harvester wheeling), H2F, H4F, H8F and H16F that consisted of a Harvester wheeling plus the sequence, respectively, of two, four, eight and sixteen wheelings of forwarder, where the last three treatments make up the wood extraction stage, with presence or absence of residual biomass. The experimental design was a randomized block with three replications. Soil samples, with preserved structure, were collect in volumetric rings in the layers of 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, and 0.40-0.60 m. The following aspects were evaluated: (i) the effect of the machines on the soil/residue: tire contact area, pressure applied by the machines on the soil, and layer of residual biomass; (ii) the composition soil properties bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity, pore size distribution, water storage; and (iii) the functionality soil properties: air permeability, the saturated hydraulic conductivity, preconsolidation tension, and penetration resistance in the field. When associating composition and functionality soil properties, it was possible to observe that compression caused by harvesting machines wheeling can be beneficial in more sandy soils, by modifying the porous system to increase pores responsible for water retention in deeper soil layers. The number of forwarder wheelings in the same line will depend on the considered soil depth; overall, two and four passes in the presence of harvest residues, and only two passes in the absence of such residues.

**Keywords:** forest soil, soil compaction, soil structural quality, commercial forest.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da colheita florestal. a) uso de motosserra (manual), b) trator agrícola adaptado (semimecanizado), c) <i>Harvester</i> (mecanizado), d) <i>Forwarder</i> (mecanizado).....	15
Figura 2 – Máquinas florestais utilizada na operação de colheita da madeira. A) Trator florestal <i>Harvester</i> utilizado na derrubada e processamento das árvores; B) Trator florestal <i>Forwarder</i> utilizado no transporte da madeira para a margem da estrada. .	21
Figura 3 - Croqui da distribuição dos tratamentos e repetições na área de estudo em plantio do <i>Eucalyptus dunnii</i> .....	24
Figura 4 - Determinação da área de contato rodado-solo. A) demarcação do rodado <i>Harvester</i> ; B) foto digital com referência da trena e C) demarcação do rodado <i>Forwarder</i> .....	24
Figura 5 - Forma quadrada utilizada para determinação da camada de resíduos. ...	25
Figura 6 - Permeâmetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade hidráulica do solo saturado.....	30
Figura 7 - Densidade do solo (A), porosidade total (B), microporosidade (C) e macroporosidade (D) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.....	35
Figura 8 - Distribuição do tamanho de poros do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.....	36
Figura 9 - Armazenamento de água do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.....	37
Figura 10 - Densidade do solo ( $D_s$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas. ....	38
Figura 11 - Porosidade total ( $P_t$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas. ....	39
Figura 12 - Macroporosidade ( $M_a$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas. ....	40
Figura 13 - Microporosidade ( $M_i$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas. ....	41
Figura 14 - Distribuição do tamanho de poros ( $\mu_m$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, para as quatro camadas avaliadas. ....	42
Figura 15 - Armazenamento de água do Argissolo Vermelho-Amarelo na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas. ....	43
Figura 16 - Condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm h}^{-1}$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.....	44
Figura 17 - Permeabilidade ao ar ( $K_a$ , $\mu\text{m}^2$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo no corte, submetido a tensão matricial ( $\Psi_m$ ) 10 kPa para as quatro camadas avaliadas. ....	45
Figura 18 - Resistência do solo à penetração a campo (RP) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.....	45
Figura 19 - Pressão de preconsolidação (kPa) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.....	46

Figura 20 - Condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm h}^{-1}$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.....	47
Figura 21 - Permeabilidade ao ar ( $K_a$ , $\mu\text{m}^2$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), na tensão 10 kPa para as quatro camadas avaliadas.....	48
Figura 22 - Resistência do solo à penetração a campo do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.....	49
Figura 23 - Pressão de preconsolidação (kPa) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria e densidade de partículas do solo sob plantio de <i>Eucalyptus dunnii</i> , em Pantano Grande, RS.....	20
Tabela 2 - Características do povoamento florestal. ....	21
Tabela 3 - Descrição das máquinas de colheita florestal utilizadas na área do estudo. ....	22
Tabela 4 - Valores de área de contato e pressão exercida pelas máquinas sobre o solo.....	33
Tabela 5 - Valores médios da biomassa residual ( $\pm$ desvio padrão) da colheita florestal nos blocos da área do experimento. ....	34

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2 HIPÓTESES</b> .....	<b>12</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
3.1 OBJETIVO GERAL .....	13
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS .....	13
<b>4 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
4.1 COLHEITA E MECANIZAÇÃO FLORESTAL .....	13
4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO .....	16
4.3 BIOMASSA FLORESTAL .....	18
<b>5 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>20</b>
5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	20
5.2 DELINEAMENTO EXPERIEMENTAL E AMOSTRAGEM .....	22
5.3 PROPRIEDADES DE COMPOSIÇÃO .....	27
5.3.1 Granulometria e densidade de partículas .....	27
5.3.2 Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) .....	27
5.3.4 Distribuição tamanho de poros e armazenamento de água .....	28
5.4 PROPRIEDADES DE FUNCIONALIDADE .....	28
5.4.1 Permeabilidade do solo ao ar (Ka) e condutividade hidráulica saturada (Ksat) .....	28
5.4.2 Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) .....	30
5.4.3 Resistência do solo à penetração a campo (RP) .....	31
5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	31
<b>6 RESULTADOS</b> .....	<b>33</b>
6.1 TRÁFEGO DAS MÁQUINAS SOBRE O SOLO .....	33
6.2 PROPRIEDADES DE COMPOSIÇÃO DO SOLO .....	34
6.2.1 Corte .....	34
6.2.2 Extração de madeira .....	37
6.3 PROPRIEDADES DE FUNCIONALIDADE DO SOLO .....	44
6.3.1 Corte .....	44
6.3.2 Extração de madeira .....	46
<b>7 DISCUSSÃO</b> .....	<b>51</b>
7.1 ÁREA DE CONTATO, PRESSÃO DAS MÁQUINAS SOBRE O SOLO E CAMADA DE RESÍDUOS .....	51
7.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO .....	52
<b>8 CONCLUSÃO</b> .....	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta cerca de 7,83 milhões de hectares de floresta plantada (IBÁ, 2019), constituídos por florestas originadas de plantios ou semeaduras deliberadas legalmente. Esses plantios comerciais representam cerca de 1% de todo território nacional (IBÁ, 2019). Os plantios são principalmente de *Eucalyptus* spp. na ordem de 5,7 milhões de hectares, *Pinus* sp. que somam 1,6 milhões, e demais espécies como seringueira, acácia, teca e paricá, as quais totalizam 590 mil hectares (IBÁ, 2019). Esse aumento de área plantada deve-se à crescente demanda por madeira com diferentes finalidades industriais como pisos, painéis de madeira, papel e celulose, madeira serrada e carvão vegetal.

Com o aumento significativo da produtividade dos sítios florestais, torna-se fundamental a implementação de técnicas que visem ao equilíbrio entre as altas taxas produtivas e a capacidade de resiliência do sistema solo, especialmente para minimizar impactos negativos como a degradação dos solos, originados da dinâmica de compactação decorrente das atividades de colheita florestal.

A compactação do solo apesar de ser um problema antigo, ainda é bastante recorrente nas áreas agricultáveis, isso porque, com o avanço tecnológico, as máquinas estão cada vez maiores e mais pesadas, especialmente as utilizadas nas operações de colheita, corte e baldeio das plantações florestais, como relatado desde os primeiros estudos na década de 90 e anos 2000 (SEIXAS, 1998; SUZUKI, 2005, SAMPIETRO; LOPES, 2011, REICHERT et al., 2018). O intenso tráfego de máquinas dentro do povoamento florestal causa problemas de ordem ambiental, em sua maioria relacionados à compactação do solo (SZYMCZAK, 2014). Uma das respostas do solo a esse impacto é o comprometimento de seu espaço poroso, pois a compactação resulta na aproximação das partículas que compõe o solo, o que aumenta a densidade do solo e afeta a infiltração e o movimento de água no solo, conferindo ainda maior resistência mecânica ao crescimento das raízes de plantas (REICHERT et al., 2010).

A dinâmica de compactação em solos sob uso florestal difere da observada em solos de uso agrícola devido às espécies cultivadas, dimensão e ciclos das culturas cultivadas e, ainda, em função do maquinário utilizado (GREACEN; SANDS, 1980). Segundo Reichert et al. (2007), a compactação em áreas agrícolas e de pastagens ocorre comumente na camada superficial do solo, enquanto em áreas florestais, por

utilizar máquinas maiores e mais pesadas, a compactação pode atingir a camada de até 0,80 m de profundidade, dependendo da relação carga e distribuição nas rodas dessas máquinas (WARKOTSCH, 1994; KELLER, 2005; KELLER et al., 2014; SAMPIETRO; LOPES, 2016). A resistência à compactação está associada a fatores internos como a classe de solo, a textura, a umidade, o manejo, o teor de matéria orgânica do solo e à presença ou não de resíduos da biomassa florestal sobre o solo (REICHERT et al., 2007; BRAIDA et al., 2010), bem como fatores externos como o peso de máquinas, inflação de pneus e tipo de rodado (LEBERT; HORN, 1991; DIAS JUNIOR et al., 1999; AJAYI et al., 2009).

Uma das metodologias que se aplicam, com o objetivo de minimizar os impactos negativos da compactação, refere-se à manutenção, sobre o solo, do aporte residual da biomassa originada pela floresta e da biomassa residual advinda da colheita de madeira, as quais promovem um efeito amortecedor sobre a pressão exercida pela máquina (área de contato do pneu-solo) (REICHERT et al., 2018). Apesar da existência de estudos que avaliem as relações dos sistemas de colheita mecanizada com a compactação de solos florestais, ainda são poucos expressivos os que associam a manutenção do aporte residual da biomassa florestal a distintas intensidades de tráfego de máquina como o *Harvester* e o *Forwarder*.

Nesse sentido, este trabalho objetivou avaliar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas colhedoras de madeira (*Harvester* e *Forwarder*) sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo franco-areno-argiloso, com e sem aporte da biomassa residual da colheita de *Eucalyptus dunnii*.

## 2 HIPÓTESES

O tráfego mecanizado na colheita florestal impõe grandes pressões sobre o solo, alterando as propriedades físico-mecânicas, com redução na funcionalidade do solo. Como medida de remediação ao intenso tráfego de máquinas, o aporte da biomassa residual advindo do corte raso deixado na área minimiza o grau de compactação.

### 3 OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos da intensidade de tráfego de máquinas colhedoras de madeira (*Harvester* e *Forwarder*, corte e extração) sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo franco-areno-argiloso, com e sem aporte da biomassa residual da colheita.

#### 3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- a) Relacionar a presença da biomassa residual do povoamento de eucalipto na estrutura e funcionalidade do solo durante o tráfego para baldeio de madeira;
- b) Estabelecer o limite de intensidade de tráfego na colheita florestal para minimizar o impacto do tráfego na estrutura e funcionalidade do solo.

### 4 REVISÃO DE LITERATURA

#### 4.1 COLHEITA E MECANIZAÇÃO FLORESTAL

O sistema de colheita florestal pode ser definido como a integração de um conjunto de atividades que permitam o fluxo constante de madeira, evitando os pontos de estrangulamento no processo produtivo da empresa, levando os equipamentos à sua máxima utilização (MACHADO et al., 2014). Os sistemas de colheita podem ser classificados como sistemas de toras compridas (*Tree-length*), sistemas de árvores inteiras (*Full-tree*), sistemas de árvores completas (*Whole-tree*) e sistema de cavaqueamento (*Chipping*).

Nos distintos sistemas de colheita ocorrem diferentes operações mecanizadas, padronizadas de acordo com o destino do produto final, como o preparo e baldeio da madeira colhida até os locais de transporte (MACHADO et al., 2014). Por ser a última etapa do processo produtivo de florestas plantadas, a colheita é considerada a parte mais importante do ponto de vista técnico e econômico, chegando a representar 50% ou mais dos custos totais da madeira posta na indústria (SILVA; 2003; MACHADO et al., 2014).

A modernização do setor florestal, impulsionada pela expansão das áreas de florestas plantadas, tem proporcionado maior eficiência produtiva e

consequentemente, ganhos econômicos. Esse avanço tecnológico, iniciado na década 90, impulsionou as taxas de importação de novas tecnologias internacionais para o país (SZYMCZAK et al., 2014). As quais têm substituído equipamentos adaptados dos setores agrícolas e industrial, que por muitos anos foram utilizados no setor florestal (MACHADO et al., 2014). Atualmente há máquinas e equipamentos altamente produtivos e multifuncionais, utilizados por favorecer o aumento da produtividade florestal, melhorar a qualidade do manejo florestal na colheita e minimizar os impactos ecossistêmicos, corroborando com o desenvolvimento sustentável e competitividade das empresas do setor florestal (PEREIRA; LOPES; DIAS, 2015). Tais equipamentos tem se tornado cada vez maiores e mais pesados, o que gera impactos negativos na qualidade dos sítios florestais.

Apesar da evolução da colheita de madeira nos últimos anos, o Brasil ocupa a quarta posição entre os países com maior custo de produção, sendo necessária a busca por alternativas, a exemplo de novos subsistemas (combinações de máquinas que cortem e processem a madeira), que visem o aumento da produtividade e redução dos custos (SANTOS et al., 2016). Os métodos de colheita antigos consistiam em processos manuais e semi-mecanizados, sem alternativas de equipamentos, os quais demandavam elevada mão de obra, o que tornava as operações onerosas e com alto risco de acidente. No cenário brasileiro, a colheita florestal evoluiu significativamente, passando do uso de motosserras para a utilização de equipamentos tecnológicos como o *Harvester* (Figura 1).



Figura 1 - Evolução da colheita florestal. a) uso de motosserra (manual), b) trator agrícola adaptado (semimecanizado), c) *Harvester* (mecanizado), d) *Forwarder* (mecanizado).



Fonte: autor.

Composta pelas etapas de corte (derrubada, destopamento, desganhamento e traçamento), descascamento (quando executado no campo) e extração (baldeio), a colheita florestal mecanizada utiliza principalmente máquinas como:

1. **Harvester:** trator florestal de derrubada, desganhamento, traçamento, destopamento, descascamento e empilhamento;
2. **Feller Buncher:** trator florestal de derrubada e empilhamento;
3. **Forwarder:** trator florestal de extração da madeira por baldeio;
4. **Skidder:** trator florestal de extração por arraste.

Nas atividades de colheita florestal no Brasil, o *Harvester* e o *Feller buncher* são comumente utilizadas para o corte florestal mecanizado, enquanto para extração (baldeio) utilizam-se o *Forwarder* e o *Skidder* (NUNES, 2010). A escolha da máquina para a colheita está associado ao sistema de colheita utilizado, à produção e, principalmente, à exigência industrial e ao destino do produto final, pois esses determinam o dimensionamento das toras, ou seja, os comprimentos e diâmetros dos sortimentos (ROBERT, 2012; MACHADO et al., 2014).

## 4.2 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O solo quando submetido a pressões externas, em condições inadequadas de umidade, tende a se deformar, fato explicado pelo fenômeno da compressibilidade, o qual é influenciado pelo manejo e à intensidade de tráfego aplicado, considerando suas características edafoclimáticas (REICHERT et al., 2010; SAMPIETRO, 2013).

Diferentes sistemas de manejo do solo têm a finalidade de criar condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das culturas. Porém, a intensidade do manejo pode favorecer o processo de compressão, o qual é mediado por fatores externos, como a intensidade e frequência da carga aplicada, tipo de pneu, inflação de pneu, área de contato, e fatores internos, como o histórico da tensão, umidade, textura, estrutura, mineralogia e conteúdo de carbono orgânico do solo (LEBERT; HORN, 1991; DIAS JUNIOR et al., 1999; AJAYI et al., 2009).

Quando uma pressão externa é aplicada ao solo por máquinas, equipamentos de transporte ou animais, ocorre um novo arranjo das partículas, o que reduz o espaço poroso do solo, eleva a densidade e a resistência à penetração e, conseqüentemente, acentua o estado de compactação do solo (GUBIANI et al., 2013). Como exemplo pode-se citar a pressão de inflação de pneu, a qual, ao aumentar, reduz a área de contato pneu-solo, favorecendo a formação de bulbos de tensão com dissipação vertical da carga aplicada na interação solo-pneu (KELLER, 2005; HORN; PETH, 2011; MION et al., 2016), os quais atingem maiores profundidade quanto maior for a carga total aplicada (BRANDT, 2009).

O teor e o tipo de argila também regem à compressibilidade do solo, modificando a profundidade de transmissão e a persistência da compactação. Assim, quanto mais elevado o teor de argila, maior a profundidade a qual a pressão é transmitida e maior será a espessura da camada compactada (VEIGA et al., 2007). Reichert et al. (2018) observaram que três passadas de *skidder* sobre solo argiloso foi capaz de alterar a estrutura do solo até 0,40 m de profundidade.

Solos argilosos são, em geral, mais suscetíveis à compactação pelo tráfego de máquinas do que os mais arenosos, devido à maior porosidade total e maior capacidade de armazenamento de água (SEVERIANO et al., 2010; GUBIANI; REINERT; REICHERT, 2014b). Isso faz com que os solos argilosos retenham maior conteúdo de água por um longo período, sendo necessária a determinação da

umidade antes que o mesmo possa ser cultivado ou trafegado (SILVA et al., 2000; NUNES, 2010).

Um dos fatores que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é a umidade (SAMPIETRO; LOPES; REICHERT, 2015). Desse modo, quando os solos estão secos, sua capacidade de suporte de carga aumenta, podendo ser suficiente para resistir às pressões aplicadas e tornar o efeito da compactação do solo não significativo (REICHERT et al., 2007; REICHERT et al., 2009; REICHERT et al., 2010; ARAUJO JUNIOR, 2011). Contudo, sob condições de alto conteúdo de água, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo a formação de camadas compactadas (SILVA et al., 2002; BRAIDA et al., 2010; GUIMARÃES JUNNYOR, 2019). A água no solo atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas (CUNHA, et al., 2002; GUBIANI et al., 2013). Assim, o movimento das partículas de solo é favorecido pelo aumento do conteúdo de água no solo, alterando seus limites de consistência, ou seja, na condição tenaz eleva sua resistência mecânica e na condição de plasticidade aumenta sua capacidade compressiva (SAMPIETRO, 2013).

O comportamento compressivo do solo é dinâmico, sendo resultante da aplicação de pressões externas. A capacidade de suporte de carga do solo e sua trafegabilidade são obtidas por meio de ensaios de compressibilidade em laboratório, a partir da curva de compressão do solo e da análise da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) (SAMPIETRO, 2013). Porém, no campo, o processo de deformação do solo ocorre de forma natural e gradual se comparado com ensaios de compressibilidade em laboratório. Isso porque nas condições de campo o solo é submetido a diferentes cargas, pela passagem de máquinas, em diferentes intervalos de tempo (MORDHORST et al., 2012). Embora essa capacidade de suporte seja dinâmica, os valores de pressão de preconsolidação encontrados são inferiores a 300 kPa na agricultura, pecuária e silvicultura (REICHERT et al., 2010).

A presença de uma estrutura maciça e adensada nas camadas superficiais e subsuperficiais é comum na maioria dos solos cultivados intensivamente. Valores de densidade do solo e de resistência a penetração mais elevados prejudicam a aeração, penetração e a proliferação de raízes (REINERT; REICHERT, 2006). Porém, não existe um consenso entre os autores sobre o nível crítico da densidade do solo, ou seja, o valor acima do qual o solo é considerado compactado. Segundo Reichert et al.

(2009), para solos franco-arenosos densidades com valores de 1,70 a 1,80 Mg m<sup>-3</sup> são consideradas críticas. Em solos arenosos (22% de argila) com 73% de areia, há redução do crescimento radicular devido à característica de solo solto (ROSELEM et al. 1999), mas as raízes têm maior crescimento quando o contato destas com o solo aumenta em virtude do incremento das partículas sólidas em determinado volume de solo (KOOISTRA et al. 1992). Por existir essa estreita relação entre porosidade do solo e crescimento radicular, valores de macroporosidade acima de 10 % favorecem o desenvolvimento das raízes mesmo com resistência a penetração acima de 2 MPa, o que permite o crescimento do sistema radicular em maior profundidade na busca de água e nutrientes (COLLARES et al. 2006).

A compactação, além de reduzir o volume do solo não saturado, pode modificar a continuidade e número de poros com diferentes diâmetros, alterando a dinâmica ar-água (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000; STRECK et al., 2004). Essa descontinuidade dos poros restringe a funcionalidade daqueles poros responsáveis pela aeração, drenagem, crescimento das raízes e habitats da fauna edáfica do solo, a exemplo dos macroporos (REICHERT et al., 2007; SAMPIETRO, 2013; ROMERO et al., 2014).

O tráfego de máquinas maiores e, conseqüentemente, mais pesadas pode acentuar os efeitos da redução dos macroporos, caso o solo seja trafegado em condição inadequada de umidade, ou seja, na zona de plasticidade (BRAIDA et al. 2010; SAMPIETRO; LOPES; REICHERT, 2015). Com isso, o impedimento dos fluxos de água, de gases (oxigênio e dióxido de carbono) e dos nutrientes, além da temperatura, pode comprometer o desenvolvimento das plantas (FOLONI et al., 2006; REICHERT et al., 2007), por prejudicar a transpiração e o acúmulo de matéria seca (FOLONI et al., 2006), além de aumentar a resistência do solo a penetração (LIMA et al., 2012).

#### 4.3 BIOMASSA FLORESTAL

A biomassa florestal, resíduos vegetais, ou biomassa florestal residual, configura naquele volume que não é destinado à indústria na ocasião da colheita florestal, como os galhos, folhas, copa, ponteiros e até mesmo a casca da madeira (SANQUETTA, 2002). A biomassa florestal, expressa em massa, normalmente classifica-se em três compartimentos distintos para análise e estimativa, definidos

como: a biomassa viva horizontal acima do solo, composta de árvores e arbustos, a biomassa morta acima do solo, composta pela serapilheira e troncos caídos, e a biomassa abaixo do solo, composta pelas raízes (MARTINELLI et al., 1994).

O acúmulo de biomassa é resultante dos fatores bióticos e abióticos, como a idade do povoamento, variabilidade genética, nutrição, precipitação, temperatura, altitude, latitude e tratos silviculturais (SILVEIRA et al. 2008). Os ecossistemas florestais contêm cerca de 90% da biomassa do planeta (GARDNER; MANKI 1981), sendo que a biomassa residual gerada na colheita da madeira representa cerca de 30% do total da biomassa de uma árvore (FAO, 1990). Szymczak (2014) quantificou a biomassa residual originária da colheita mecanizada de *Pinus taeda* L. aos 22 anos de idade e verificou que foram geradas, em média, 100 toneladas/ha de acículas, galhos, ponteiro e serapilheira distribuídas na trilha de passagem das máquinas.

O impacto da passagem das máquinas sobre o solo é minimizado pela presença dos resíduos, especialmente após as colheitas. Seixas et al. (1998), com base na densidade do solo, observaram uma redução média de 56% no nível de compactação do solo com cobertura em relação ao solo sem cobertura de biomassa, ambos expostos ao tráfego de máquinas. Os autores ainda afirmaram que a presença de resíduos da colheita de madeira nas linhas de passagem das máquinas, pode retardar a compactação do solo, mesmo que não seja de forma expressiva.

No entanto, a presença da biomassa florestal residual, na maioria dos casos, não evita que haja o processo de compactação, mas pode restringi-la apenas à superfície do solo e em níveis abaixo do limite crítico para as principais propriedades físicas do solo (REICHERT et al., 2007; SZYMCZAK et al., 2014). Reichert et al. (2018), ao avaliar o tráfego de um *skidder* sobre os resíduos de pinus sobre o solo, observaram que cerca de 9,8 a 15,6 Mg ha<sup>-1</sup> não foram o suficiente para dissipar toda a pressão exercida pela intensidade do tráfego da *máquina*, o que levou à ocorrência da compactação do solo.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi conduzido na área operacional de colheita de madeira, pertencente à empresa CMPC Celulose Riograndense, localizada no Horto Florestal Sobradinho, município de Pantano Grande – RS. Possui coordenadas geográficas 30°17'40" S e 52°31'15" W e altitude média de 80 m. O clima da região classifica-se como Cfa de acordo com a Köppen e Geiger, com temperatura média anual de 19.4 °C e média anual de pluviosidade de 1350 mm (MORENO 1961). O solo da área foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo (Santos et al., 2018) de textura franco-argilo-arenosa (Tabela 1).

Tabela 1 – Granulometria e densidade de partículas do solo sob plantio de *Eucalyptus dunnii*, em Pantano Grande, RS.

Camada m	Densidade de partículas g cm <sup>-3</sup>	Areia	Areia	Areia	Silte g kg <sup>-1</sup>	Argila g kg <sup>-1</sup>
		grossa g kg <sup>-1</sup>	fina g kg <sup>-1</sup>	total g kg <sup>-1</sup>		
0,0 – 0,10	2,56	239,2	432,1	671,3	172,3	156,3
0,10 – 0,20	2,56	231,1	423,5	654,6	172,6	172,8
0,20 – 0,40	2,58	174,8	359,7	534,5	214,6	250,9
0,40 – 0,60	2,59	136,0	285,9	421,9	220,3	357,8
Média Geral	2,57	195,3	375,3	570,6	195,0	234,5

Fonte: O Autor.

A área de estudo caracteriza-se por apresentar povoamentos de *Eucalyptus dunnii*, conduzidos pelo regime de corte raso (corte final). Os dados referentes às características do povoamento florestal são discriminados na Tabela 2.

Tabela 2 - Características do povoamento florestal.

Espécie	<i>Eucalyptus dunnii</i>
Idade de corte da rotação (anos)	12
Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	15,33
Número médio de árvores por hectare	1333,00
DAP médio (cm)	18,29
Altura média (m)	25,98
Volume médio individual (m <sup>3</sup> )	0,31
Volume médio por há (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	413,23
Produtividade média do sítio (m <sup>3</sup> ano <sup>-1</sup> )	34,87

Fonte: O Autor.

O sistema operacional de colheita florestal adotado pela empresa (CMPC) é o sistema de toras curtas (*Cut-to-length*), onde a árvore é processada no interior do talhão pelo trator florestal *Harvester* (Figura 2A) e baldeada até a margem da estrada, por um *Forwarder*, em toras com 6 metros de comprimento (Figura 2B). A Tabela 3 apresenta maiores detalhes em relação às características das máquinas utilizadas na operação de colheita e transporte da madeira.

Figura 2 – Máquinas florestais utilizada na operação de colheita da madeira. A) Trator florestal *Harvester* utilizado na derrubada e processamento das árvores; B) Trator florestal *Forwarder* utilizado no transporte da madeira para a margem da estrada.



Fonte: O Autor.

Tabela 3 - Descrição das máquinas de colheita florestal utilizadas no estudo.

Máquina	Operação	Especificações e Características
<i>Harvester</i>	Corte e processamento	Maquina base: Escavadeira marca Komatsu, modelo PC200F, motor Komatsu SAA6D107E-1, potência nominal de 155 HP / 116 kW, peso operacional de 21,9 Mg, rodados de esteiras (0,6 x 4,46 m, passo de 0,05 m) e distância entre rodados de 1,80 m.
<i>Forwarder</i>	Baldeio	Marca Komatsu, modelo 895, motor 74CW3 (diesel), potência nominal de 262 hp / 193 kW, peso operacional de 20,5 Mg, rodados de pneus (710/ 70x 34 com pressão de 59 Psi / 408 kPa), distância entre rodados de 1,70 m, capacidade de compartimento de carga bruta 20,0 Mg, área de 5,2 a 7,2 m <sup>2</sup> , grua com alcance máximo de 7,50 m de distância horizontal e 8,5 m de altura. Peso da carga 7,1 Mg.

Fonte: O Autor

## 5.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E AMOSTRAGEM

Para avaliar o efeito das práticas de colheita florestal sobre as propriedades físicas do solo, o estudo foi desenvolvido em duas etapas:

- 1) Corte – a coleta de dados foi realizada após o corte e processamento da madeira, com uma passada do trator florestal *Harvester*, com os seguintes tratamentos:
  - T: sem tráfego das máquinas (Testemunha);
  - H: 1 passada de *Harvester*;
  
- 2) Extração de madeira – após uma passada do trator florestal *Harvester* foram realizadas várias passadas do trator florestal *Forwarder*, representando o



baldeio da madeira, na mesma trilha do rodado, para configurar as distintas intensidades de tráfegos que definiram os seguintes tratamentos:

- H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passadas do *Forwarder* com resíduo e sem resíduo;
- H4F: 1 passada de *Harvester* + 4 passadas do *Forwarder* com resíduo e sem resíduo;
- H8F: 1 passada de *Harvester* + 8 passadas do *Forwarder* com resíduo e sem resíduo;
- H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passadas do *Forwarder* com resíduo e sem resíduo;

A amostragem ocorreu em três blocos (Figura 3), constituindo estes as repetições, nas quais foram alocadas cinco parcelas amostrais de 5 m de largura por 20 m de comprimento. As parcelas foram subdivididas em subparcelas de 5m de largura por 10 m de comprimento, destinadas à segunda etapa do experimento (resíduo da colheita).

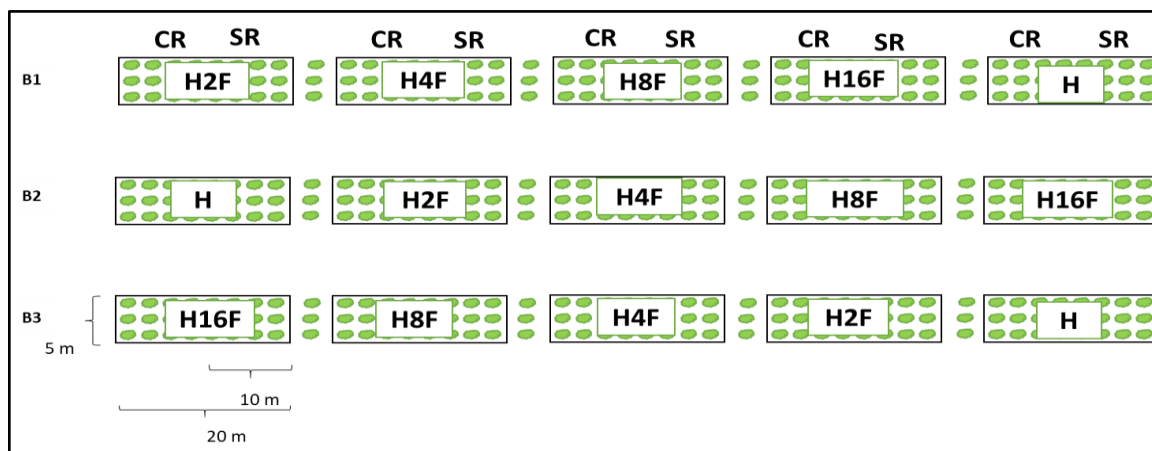
Na segunda etapa foram testadas duas condições de cobertura do solo, na perspectiva de representar a maior e menor suscetibilidade do solo à compactação pelo rodado das máquinas para as diferentes intensidades de tráfegos, sendo:

- a) solo com resíduo da biomassa florestal;
- b) solo sem resíduo da biomassa florestal,

Para representar o tratamento testemunha foram coletadas amostras de solo, dentro de cada bloco, em áreas onde não ocorreu nenhum tipo de tráfego de máquinas.

Para a execução dos ensaios, em um primeiro momento o *Forwarder* foi completamente carregado fora da área experimental, com carga de  $\pm 11,0 \text{ m}^3$  de madeira, para então realizar as passadas sempre na mesma linha de tráfego, anteriormente deixada pelo *Harvester* dentro de cada subparcela. A área de contato para o tráfego de *Harvester* foi determinada após uma passada da máquina. Para o tráfego de *Forwarder*, a determinação foi realizada para os rodados dianteiros e traseiros, após uma e dezesseis passadas da máquina sobre o solo sem resíduo, considerando uma distribuição do peso da máquina de 40% para o eixo dianteiro e 60% para o eixo traseiro (ELIASSON; WASTERLUND, 2007; SAMPIETRO, 2013).

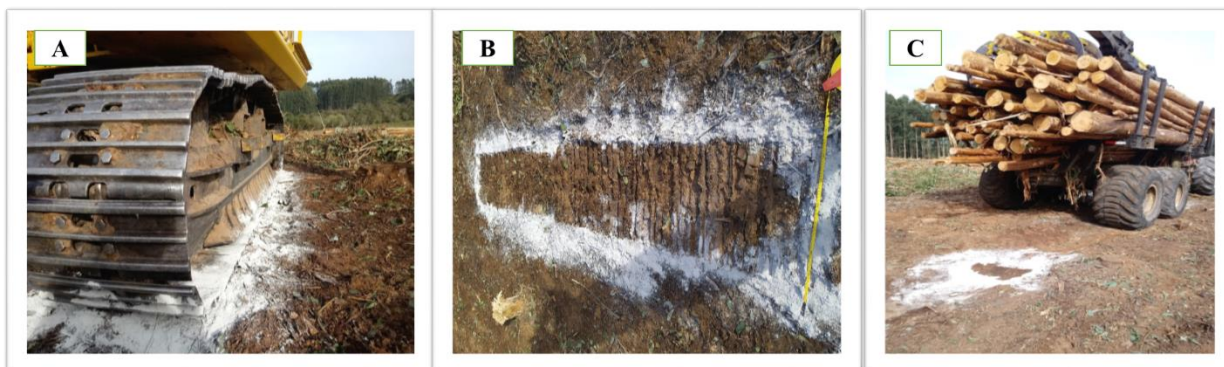
Figura 3 - Croqui da distribuição dos tratamentos e repetições na área de estudo em plantio do *Eucalyptus dunnii*.



Fonte: O Autor.

A medição da área de contato rodado-solo das máquinas foi realizada com auxílio de cal virgem para demarcação dos pneus. Após a saída da máquina, foi colocado uma trena (referencial) no sentido longitudinal para registro de uma imagem digital (Figura 4). Finalmente, com auxílio do programa de domínio público (ImageJ), a área de contato rodado-solo foi calculada.

Figura 4 - Determinação da área de contato rodado-solo. A) demarcação do rodado *Harvester*, B) foto digital com referência da trena e C) demarcação do rodado *Forwarder*.



Fonte: O Autor.

A pressão estática exercida pelo rodado sobre a superfície do solo foi calculada de acordo com Wasterlund (1994):

$$P_c = \frac{W}{A} \cdot 98,07 \quad (1)$$

em que:

P<sub>c</sub>= pressão rodado-solo, (kPa).

W= massa da máquina sobre o rodado, (kg).

A= área de contato rodado-solo (cm<sup>2</sup>).

A camada de resíduo da biomassa florestal da colheita de madeira foi determinada por meio de amostragens com um gabarito de metal quadrado de 0,25 x 0,25 m, sendo coletado ao acaso em dois pontos dentro de cada bloco com resíduo (Figura 5). O resíduo amostrado foi acondicionado em sacos plásticos e identificados no campo, pesados e levados ao laboratório da empresa. Contidas em sacos de papel, as amostras foram colocadas na estufa de circulação e renovação de ar com temperatura de 60 °C por 72 horas até obtenção do peso constante, para obtenção da massa seca, podendo assim determinar a quantidade da biomassa residual por metro quadrado que permaneceu na área após a extração de madeira.

Figura 5 - Forma quadrada utilizada para determinação da camada de resíduos.



Fonte: O Autor.

Para melhor o entendimento sobre as propriedades do solo, as análises foram discriminadas em propriedades de composição: densidade do solo (D<sub>s</sub>), porosidade total (P<sub>t</sub>), macroporosidade (M<sub>a</sub>) e microporosidade (M<sub>i</sub>), distribuição tamanho de poros e armazenamento de água; e propriedades de funcionalidades: permeabilidade

do solo ao ar ( $K_a$ ), condutividade hidráulica de solo saturado ( $K_{sat}$ ), pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) e resistência do solo a penetração a campo ( $RP$ ). A diferenciação das propriedades em duas categorias considerou que propriedades de composição não descrevem funções do solo, enquanto as propriedades funcionais representam processos no tempo e no espaço (HORN; KUTILEK, 2009; REICHERT et al., 2016, 2017; HOLTHUSEN et al., 2018; RABOT et al., 2018).

Para determinação da  $D_s$ ,  $P_t$ ,  $M_a$ ,  $M_i$ ,  $K_a$ ,  $K_{sat}$ , foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em anéis volumétricos (5,7 cm de diâmetro por 4,0 cm de altura), nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade, em trincheiras abertas nos respectivos tratamentos, exatamente na linha do rodado das máquinas. Na primeira etapa, nos tratamentos T e H foram coletados 48 amostras (4 profundidades x 2 tratamentos x 3 blocos x 2 repetições); na segunda etapa, nas diferentes intensidades de tráfegos H2F, H4F, H8F e H16F, foram coletadas 192 amostras (4 profundidades x 4 tratamentos de intensidade x 3 blocos x 2 repetições x 2 palhas [com resíduo e sem resíduo]).

Para determinação da pressão de preconsolidação e índice de compressão foram coletadas amostras com estrutura preservada em anéis de 2,9 cm de altura e 10,0 cm de diâmetro, sendo composto pelo mesmo arranjo da primeira etapa. Ainda, nas mesmas camadas, foram coletadas amostras de solo deformada para a determinação da granulometria pelo método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017), e da densidade de partículas pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006).

As amostras preservadas destinadas à análise de permeabilidade ao ar foram equilibradas na tensão de 10 kPa, após atingir o equilíbrio foi determinada a massa úmida, realizado a leitura do fluxo de ar com fluxímetros e seguido da condutividade hidráulica de solo saturado com permeâmetro de carga decrescente, conforme metodologia descrita no item 5.4.1. Finalmente, as amostras foram levadas à estufa a  $.105^{\circ}\text{C}$  por 48h, para obtenção da massa seca (TEIXEIRA et al., 2017).

## 5.3 PROPRIEDADES DE COMPOSIÇÃO

### 5.3.1 Granulometria e densidade de partículas

Amostras de solo de estrutura deformada foram utilizadas para a determinação da granulometria pelo método da pipeta (Teixeira, 2017) e a densidade de partículas, pelo método do balão volumétrico modificado (GUBIANI et al., 2006).

### 5.3.2 Densidade do solo ( $D_s$ ), porosidade total ( $P_t$ ), macroporosidade ( $M_a$ ) e microporosidade ( $M_i$ )

Para a determinação da  $D_s$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ), as amostras de solo foram secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$  por 48 horas, e após determinação da massa do solo seco. Conhecendo-se o volume do anel, calculou-se a  $D_s$  por meio da equação abaixo:

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (2)$$

em que:

$M_s$ = massa de solo seco (g).

$V$ = volume da amostra de solo ( $\text{cm}^3$ ).

A  $P_t$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) foi obtida pela relação entre a fração do volume de solo ocupada por sólidos, a partir da equação:

$$P_t = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (3)$$

em que:

$D_s$ = densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

$D_p$ = densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

A  $M_i$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) determinada como sendo o conteúdo volumétrico de água no  $\Psi_m$  de -6 kPa, e a  $M_a$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) foi calculada pela diferença entre  $P_t$  e  $M_i$ .

### 5.3.4 Distribuição tamanho de poros e armazenamento de água

A distribuição do diâmetro de poros foi determinada de acordo com a expressão matemática proposta por Bouma (1973), a partir da umidade volumétrica nas tensões de 1, 6, 10, 33, 100 kPa. A equação:

$$D = \frac{4 \sigma \cos \theta}{\Psi_m} \quad (4)$$

onde:

D= o diâmetro do poro (mm).

$\sigma$ = a tensão superficial da água (73,43 kPa a 20 °C).

$\theta$ = o ângulo de contato entre o menisco e a parede do tubo capilar (considerado como 0).

$\Psi_m$ = a tensão de água no solo (kPa).

Os conteúdos de água referentes a  $\Psi_m$  10 e 1500 kPa foram usados para calcular capacidade de água disponível (CAD), para representar o armazenamento de água no solo, sendo a equação:

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot z \cdot D_s \quad (5)$$

onde:

CAD= capacidade de água disponível armazenamento de água no solo, em mm;

$\theta_{cc}$ = teor de água no solo com base em volume na capacidade de campo (10 kPa);

$\theta_{pmp}$ = teor de água no solo com base em volume no ponto de murcha permanente (1500 kPa);

z= camada onde foi coletada a amostra (mm).

## 5.4 PROPRIEDADES DE FUNCIONALIDADE

### 5.4.1 Permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) e condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ )

A  $K_a$  foi calculada a partir do fluxo de ar medido com o auxílio de um permeâmetro de carga constante, após o equilíbrio das amostras nas tensões de 10

kPa. A metodologia está baseada na quantificação do fluxo de ar que passa pela amostra de solo, no qual mantem um gradiente de pressão constante, adaptada de Vossbrink (2004). O fluxo de ar foi aplicado à pressão constante de 0,1 kPa, considerada baixa para evitar o fluxo turbulento. A condutividade do ar no solo foi calculada usando a equação:

$$k_l = \rho \times g \left( \frac{\Delta v \times L}{\Delta t \times \Delta p \times A_m} \right) \quad (6)$$

em que:

$k_l$  = condutividade ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ );

$\rho$  = densidade do ar no momento da medida ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

$g$  = aceleração da gravidade ( $981 \text{ cm s}^{-2}$ ).

$\Delta V$  = volume de ar que passa na amostra no  $\Delta t$  ( $\text{cm}^3$ ).

$\Delta t$  = variação de tempo (s).

$l$  = altura da amostra (cm).

$\Delta p$  = pressão do ar que passa pela amostra (hPa).

$A_m$  = área da amostra ( $\text{cm}^2$ ).

A densidade do ar foi calculada a partir da equação 5:

$$\rho_l = p_n \left( \frac{T_n p}{p_n T} \right) \quad (7)$$

em que:

$\rho_l$  = densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

$p_n$  = densidade padrão do ar ( $1,293 \text{ kg m}^{-3}$ ).

$T_n$  = temperatura padrão ( $273,15 \text{ K}$ ).

$p$  = pressão atmosférica durante a medida (mbar).

$p_n$  = pressão atmosférica padrão ( $1013 \text{ mbar}$ ).

$T$  = temperatura do ar durante a medida (K).

Após obtenção da condutividade do ar, foi calculada a permeabilidade ao ar através da seguinte equação:

$$ka = k_l \frac{\eta}{\rho_l g} \quad (8)$$

em que:

$K_a$ = permeabilidade ao ar ( $\mu\text{m}^2$ ).

$K_l$ = condutividade ao ar ( $\text{cm s}^{-1}$ ).

$\eta$ = viscosidade do ar ( $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ).

$\rho_l$ = densidade do ar no momento da medida ( $\text{g cm}^{-3}$ ).

$g$ = aceleração da gravidade ( $981 \text{ cm s}^{-2}$ ).

A determinação da  $K_{sat}$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ) foi com base no fluxo medido em um permeâmetro de carga constante (Figura 6), onde as amostras saturadas foram submetidas a cargas hidráulicas constantes, e três medições de fluxo de água foram feitas em intervalos de 15 minutos, sendo estendido para 30 minutos em amostras onde o fluxo foi mais lento.

Figura 6 - Permeâmetro de carga constante utilizado nas medições de condutividade hidráulica do solo saturado.



Fonte: autor.

#### 5.4.2 Pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ )

A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) foi determinada em amostras foram equilibradas a uma tensão de 10 kPa, que corresponde à capacidade de campo para solos arenosos (DIAS JUNIOR et al., 2000). As amostras foram então submetidas ao ensaio de compressibilidade em uma prensa automática de compressão uniaxial nas pressões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400 e 800 kPa. Cada tensão normal foi aplicada



pelo tempo de 0,17 h ( $\cong$ 10 min) em cada carga, de forma a se alcançar a máxima deformação da amostra para cada pressão aplicada (AMBUS, 2018). Ao término do ensaio de compressibilidade as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas, para obtenção da massa do solo seco. A  $\sigma_p$  foi determinada segundo o método de Casagrande (1936) e os dados processados de acordo com (GUBIANI et al., 2014a).

#### 5.4.3 Resistência do solo à penetração a campo (RP)

A resistência do solo à penetração (RP) foi medida no campo até a profundidade de 0,60 m, em dois pontos localizados na parte central da trilha de passagem dos tratamentos com intensidades de tráfegos. Para a testemunha foram obtidos 4 pontos amostrais equidistantes 0,50 m. Foi utilizado um penetrômetro eletrônico digital, modelo *Penetrologger*, o qual apresenta uma haste metálica, tendo na sua extremidade uma ponta em forma de cone com ângulo de vértice de 60° e base de 1 cm<sup>2</sup> (11,28 mm de diâmetro nominal). A velocidade de penetração máxima é de 2 cm s<sup>-1</sup>, obtendo-se diretamente os valores de RP na unidade de Mega Pascal (MPa), sendo estes valores registrados e após transferidos a um computador por meio de software específico. Posteriormente, foram feitas as médias das leituras (índice de cone) para cada tratamento nas camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60 m. As umidades gravimétricas do solo considerando as quatro camadas no momento de avaliação foram 0,103; 0,107; 0,111 e 0,141 kg kg<sup>-1</sup>.

#### 5.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento utilizado foi em blocos ao acaso. Todos os dados foram submetidos à análise de distribuição normal (Shapiro Wilk) e de homogeneidade de variância (Bartlett Test), à análise de variância e, quando significativa, ao teste de comparação de médias de Tukey ( $p < 0,05$ ). Os dados de permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) e condutividade hidráulica de solo saturado ( $K_{sat}$ ), devido à alta variabilidade, foram transformados com a utilização da função logaritmo (na base 10) nos valores observados.

Para a etapa de corte - tratamentos T e H (testemunha e *Harvester*, respectivamente), realizou-se apenas o teste de comparação de médias ( $p < 0,05$ ). Nos dados de extração de madeira utilizou-se o esquema de parcelas subdivididas, onde a parcela foi o fator resíduo (com e sem biomassa residual), a subparcela os tratamentos (H2F, H4F, H8F, H16F) e a subsubparcelas as profundidades (0,0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m, 0,40-0,60 m). Para todos os tratamentos de passadas de tráfego como de manejo (resíduo) foram avaliados por camada através do programa SISVAR (FERREIRA, 2011).

## 6 RESULTADOS

### 6.1 TRÁFEGO DAS MÁQUINAS SOBRE O SOLO

O *Harvester* com rodado de esteira apresentou valor de área de contato de 1,53 m<sup>2</sup>, enquanto o *Forwarder* com rodado de pneu obteve uma área de contato para o rodado dianteiro de 0,20 m<sup>2</sup> e 0,25 m<sup>2</sup> para os traseiros, apenas com uma passada, ou seja, o *Harvester* teve uma área de contato do rodado com o solo 84% superior à observada no rodado do *Forwarder*. Após 16 passadas houve redução da área de contato (rodado-solo) do *Forwarder* de 0,17 m<sup>2</sup> para o rodado dianteiro e 0,20 m<sup>2</sup> para o traseiro (Tabela 4), cerca de 14% e 29%, respectivamente.

A pressão exercida (rodado - solo) (Tabela 4) foi maior para o *Forwarder*. O *Harvester* exerceu uma pressão de 75,4 kPa, enquanto o *Forwarder* apresentou valores de 129,5 a 148,7 kPa rodado dianteiro a 154 a 199 kPa rodado traseiro, conforme o número de passadas no mesmo ponto (Tabela 4).

Tabela 4 - Valores de área de contato e pressão exercida pelas máquinas sobre o solo.

Máquinas	Área de Contato (m <sup>2</sup> )				Pressão exercida rodado-solo (kPa)			
<b>Harvester</b> (Peso operacional + peso equipamento = 23.5 Mg)	1,528				75,4			
	1 passada		16 passadas		1 passada		16 passadas	
<b>Forwarder</b> (Peso operacional + carga = 27,1 Mg)	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
	0,205	0,257	0,179	0,199	129,5	154,8	148,7	199,8

Pressão do rodado das máquinas sobre solo de acordo com Wasterlund (1994).

Fonte: O Autor.

A camada de resíduos advindo da colheita florestal apresentou valor médio de 10,3 kg m<sup>-2</sup> (±1,01) e, não apresentou diferença significativa entre os blocos avaliados (Tabela 5).

Tabela 5 - Valores médios da biomassa residual ( $\pm$ desvio padrão) da colheita florestal nos blocos da área do experimento.

Camada de resíduos (kg m <sup>-2</sup> )		
Bloco 1	Bloco 2	Bloco 3
10,4 ( $\pm$ 0,67)	8,8 ( $\pm$ 1,09)	10,9( $\pm$ 1,19)

Fonte: O Autor.

## 6.2 PROPRIEDADES DE COMPOSIÇÃO DO SOLO

### 6.2.1. Corte

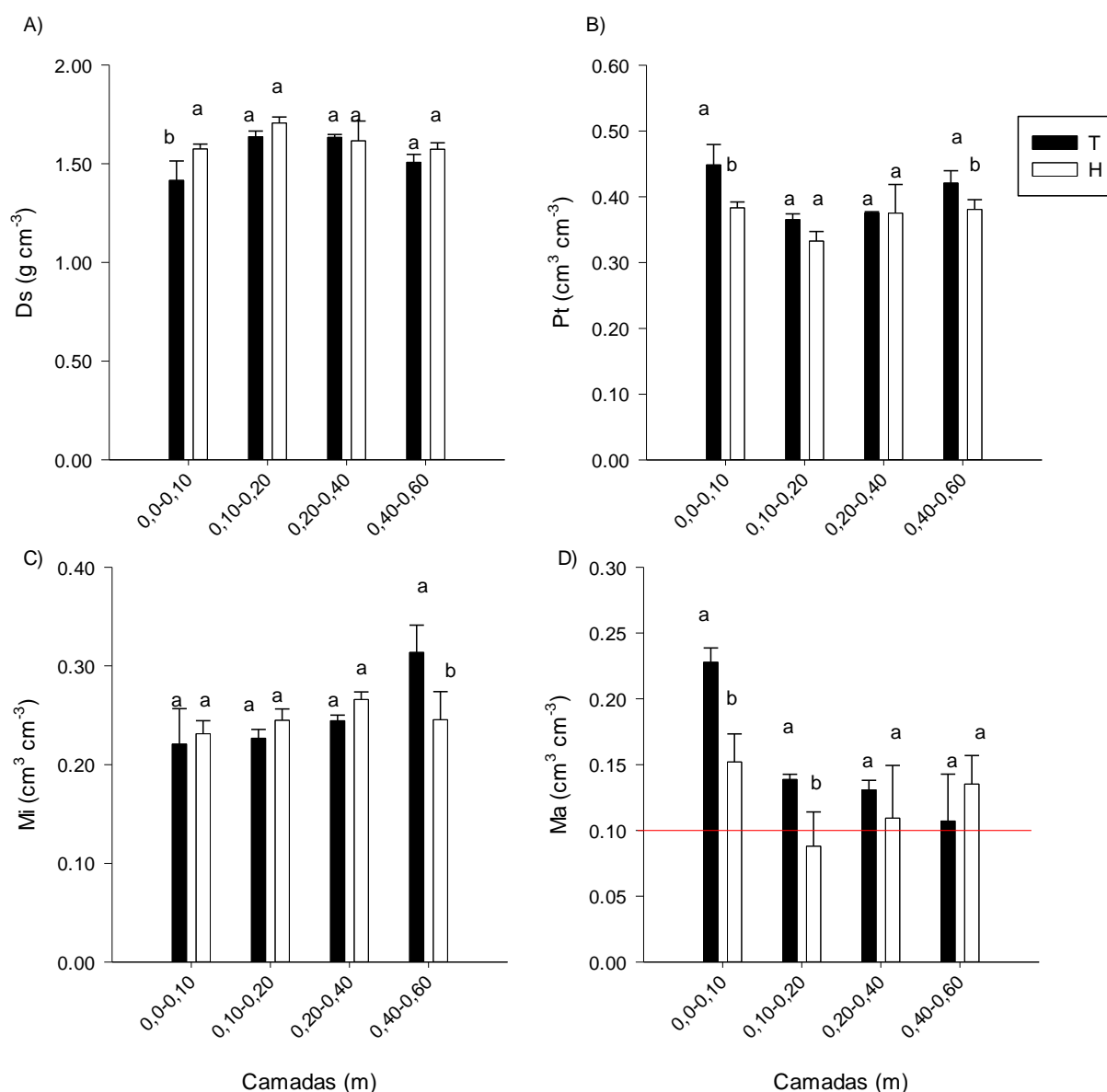
As variáveis físicas apresentaram diferença significativa entre os tratamentos logo na primeira passada do *Harvester* (H), quando comparado à área testemunha (T - área sem passagem de máquinas). O tratamento H houve um incremento em 10% nos valores de densidade do solo (Ds) na camada 0,0-0,10 m (Figura 7A), enquanto os maiores valores de porosidade total (PT) foram obtidos na área testemunha, especialmente nas camadas 0,0-0,10 m e 0,40-0,60 com 14% e 9% a mais de PT, respectivamente, em relação à área trafegada (Figura 7B).

A microporosidade (Mi) diferiu entre as camadas avaliadas com incremento de 21% para o tratamento T em relação H (Figura 7C). Para a macroporosidade (Ma) houve diferença significativa nas camadas 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, com redução de 33% e 37%, respectivamente, para o tratamento H em relação à T (Figura 7D).

A distribuição do tamanho de poros apresentou para o tratamento T o maior volume de poros na classe de diâmetro entre 300-50  $\mu$ m na camada superficial. No tratamento H o volume para as classes de poros >50  $\mu$ m foi reduzido em torno de 53% (Figura 8). Para o tratamento H, a partir da classe de diâmetro 30-9  $\mu$ m uma passada do *Harvester* mostrou efeito significativo, cerca de 22% de incremento nesse diâmetro de poros. Efeitos similares ocorreram nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m (Figura 8).

A quantidade de água retida (CAD) foi similar em ambos os tratamentos e em cada camada de solo avaliada. Houve o incremento do conteúdo de água armazenada com o aumento da profundidade avaliada (Figura 9).

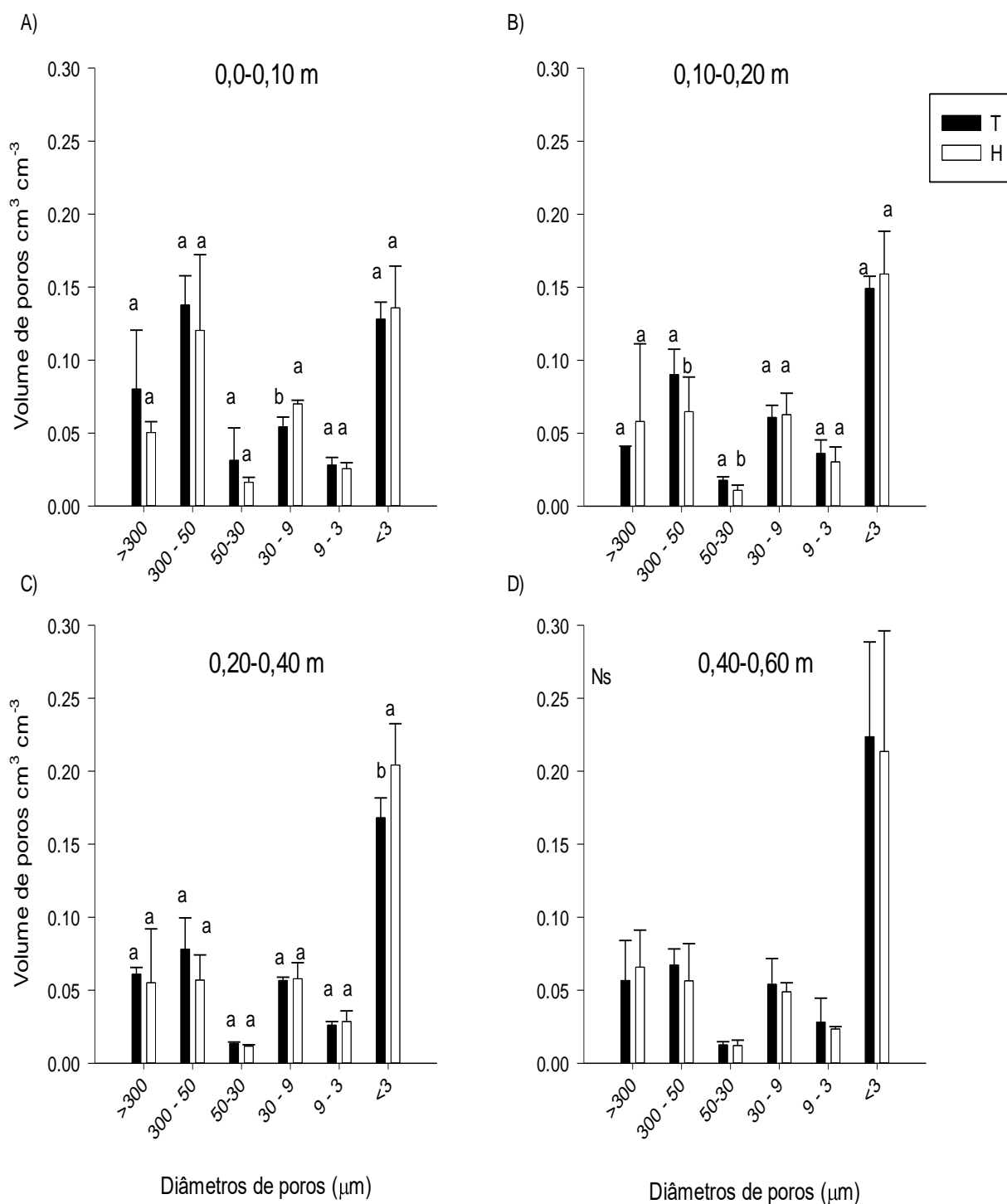
Figura 7 - Densidade do solo (A), porosidade total (B), microporosidade (C) e macroporosidade (D) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.



T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*. Letras minúsculas iguais entre os tratamentos dentro da camada não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros indicam o desvio padrão da média. Linha vermelha indica limite crítico.

Fonte: O Autor.

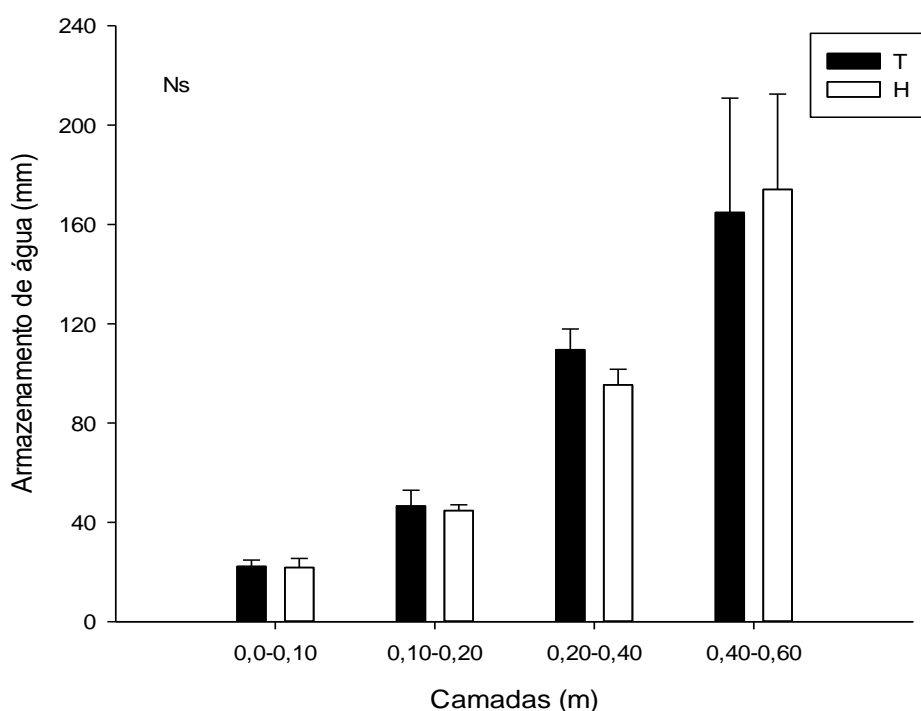
Figura 8 - Distribuição do tamanho de poros do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.



T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*; Ns: não significativo. Letras minúsculas iguais entre os tratamentos dentro do diâmetro de poros não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros mostram o desvio padrão da média.

Fonte: O Autor.

Figura 9 - Armazenamento de água do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.



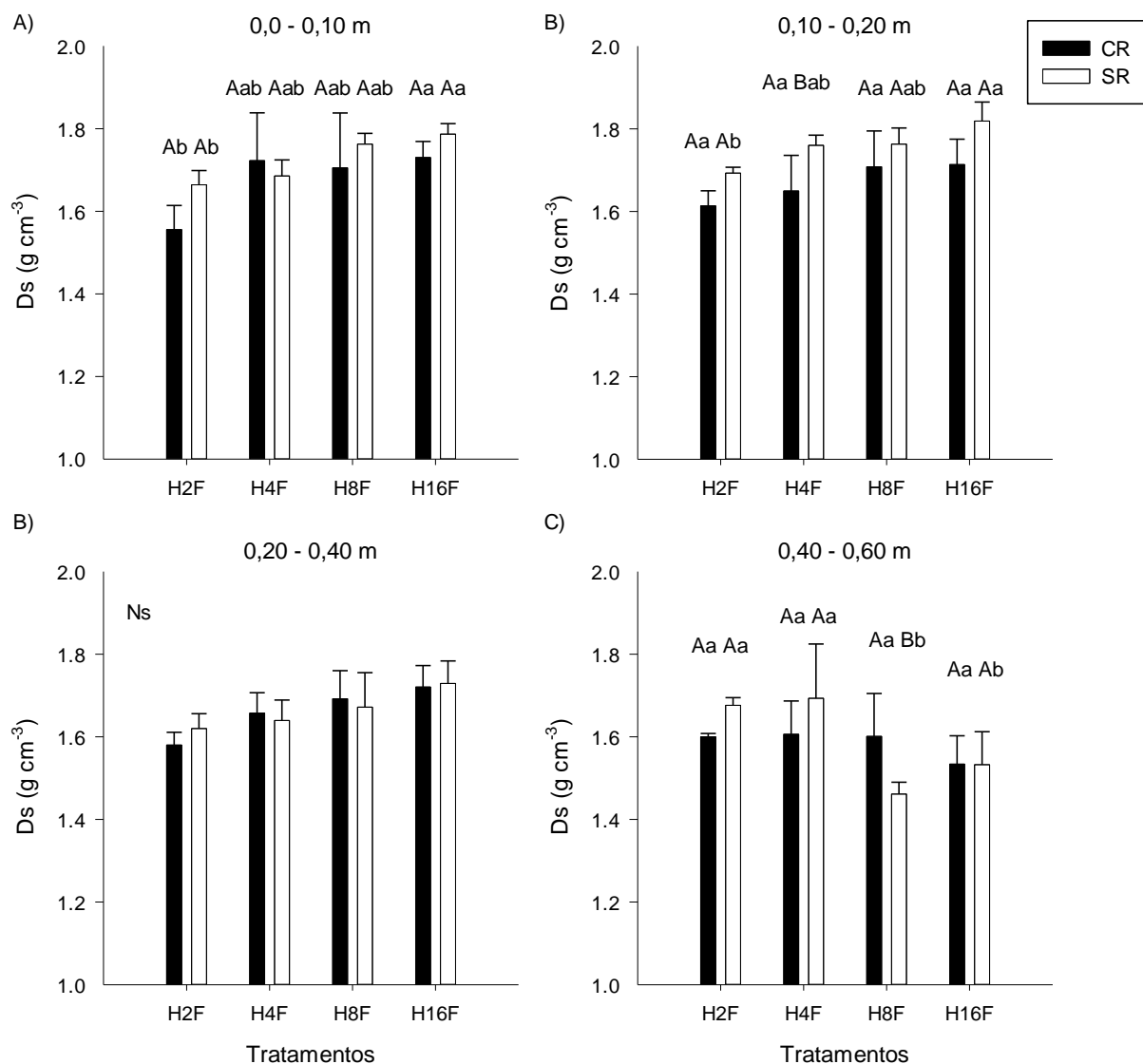
T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*. As barras de erros mostram o desvio padrão da média. Ns: não significativo.

Fonte: O Autor.

### 6.2.2 Extração de madeira

Com o aumento do tráfego de máquinas, após uma passada do *Harvester* (H) e mais 16 passadas sucessivas do *Forwarder* (H16F), houve incremento médio de 4,5% para Ds e redução da porosidade em 8,8% (Figura 10 e 11). Para as camadas 0,10-0,20 m e 0,40-0,60 m, em solo sem resíduo, foi possível verificar um efeito significativo sobre as variáveis físicas, com aumento da Ds ( $1,81 \text{ g cm}^{-3}$ ) e redução da Pt ( $0,293 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) no tratamento H16F quando comparado ao H2F (Ds= $1,69 \text{ g cm}^{-3}$  e Pt= $0,374 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Na camada mais profunda de estudo (0,40-0,60 m) foi observado um comportamento inverso, onde o tratamento com menor intensidades de tráfego H4F teve um incremento na Ds na ordem de 13% e redução de 30% para Pt em relação ao tratamento H8F (Figura 10 e 11).

Figura 10 - Densidade do solo ( $D_s$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.

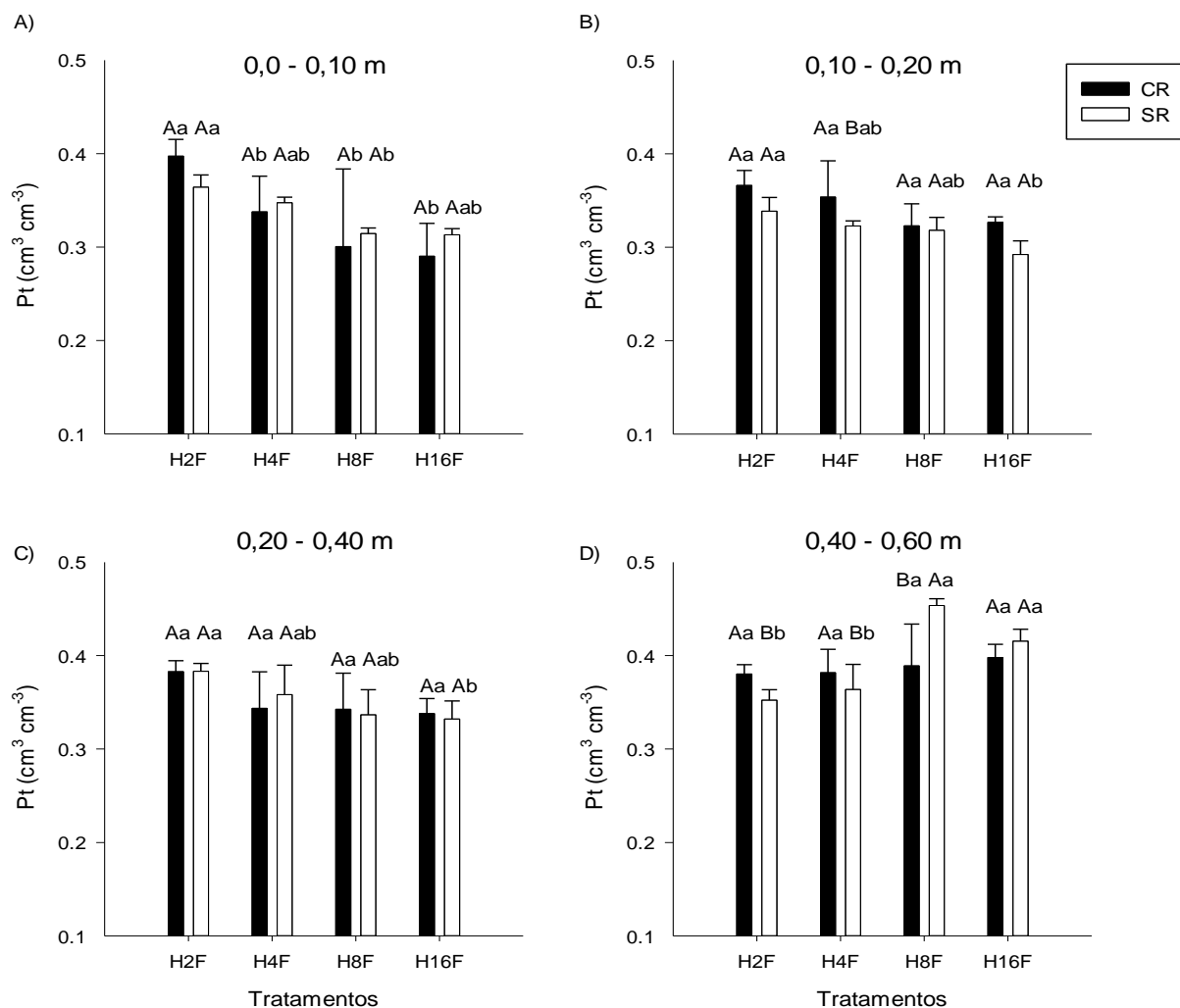


H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: não significativo. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros indicam o desvio padrão da média.

Fonte: O Autor.



Figura 11 - Porosidade total (Pt) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.



H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros indicam o desvio padrão da média.

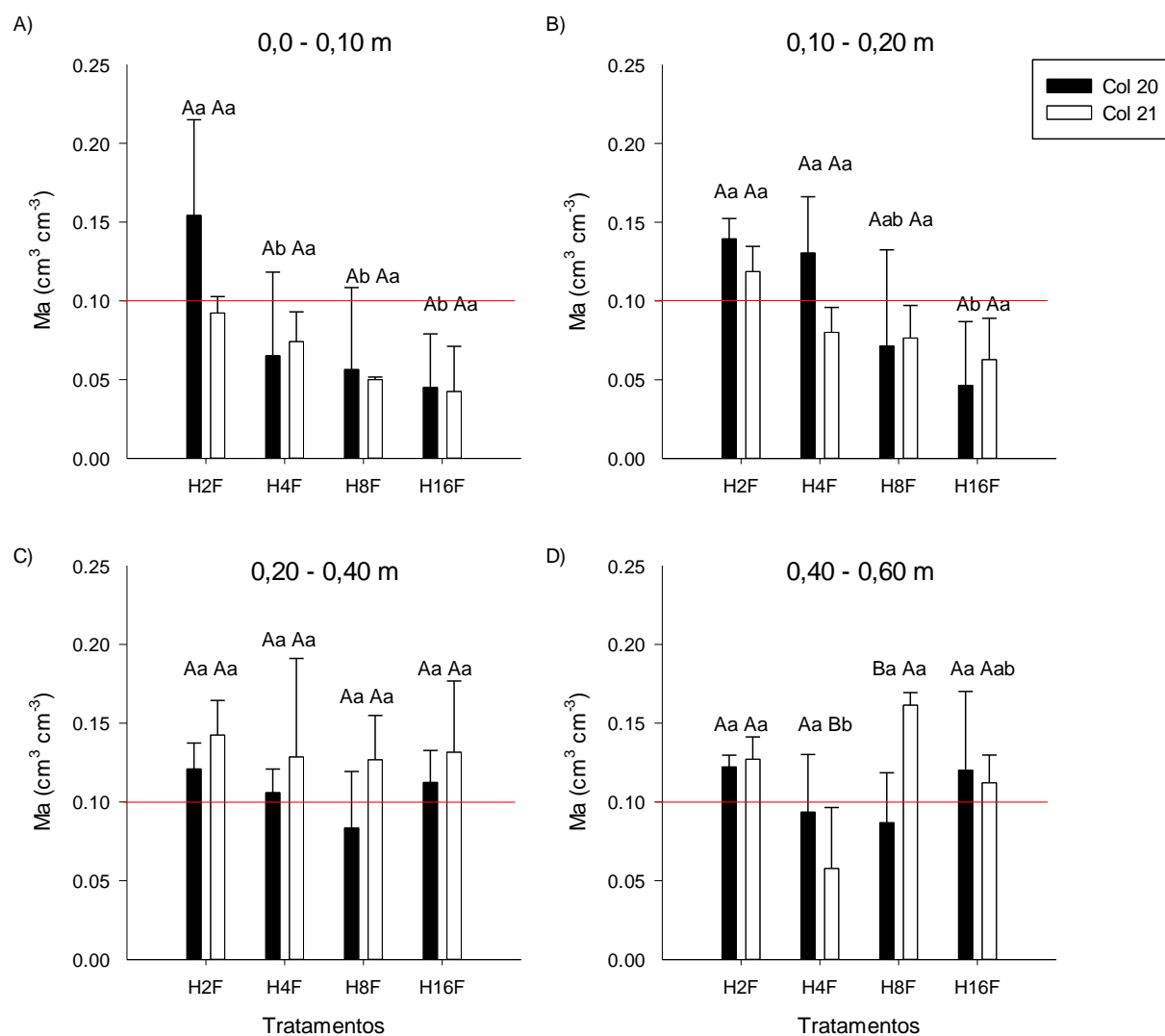
Fonte: O Autor.

A Ma, na presença de resíduo florestal, apresentou diferença significativa para as camadas de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, onde as intensidade de tráfegos H2F e H4F apresentaram os maiores valores (Figura 12). Na ausência da biomassa residual apenas a camada 0,40-0,60 m diferiu entre os tratamentos, sendo que o H4F obteve a menor Ma.

A Mi foi alterada tanto na presença como na ausência da biomassa residual e tráfego de máquinas (Figura 13), com efeito significativo apenas na camada 0,40-0,60

m na ausência do resíduo. Os tratamentos H4F, H8F e H16F apresentaram os maiores valores de Mi  $0,290 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $0,286 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,304 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente.

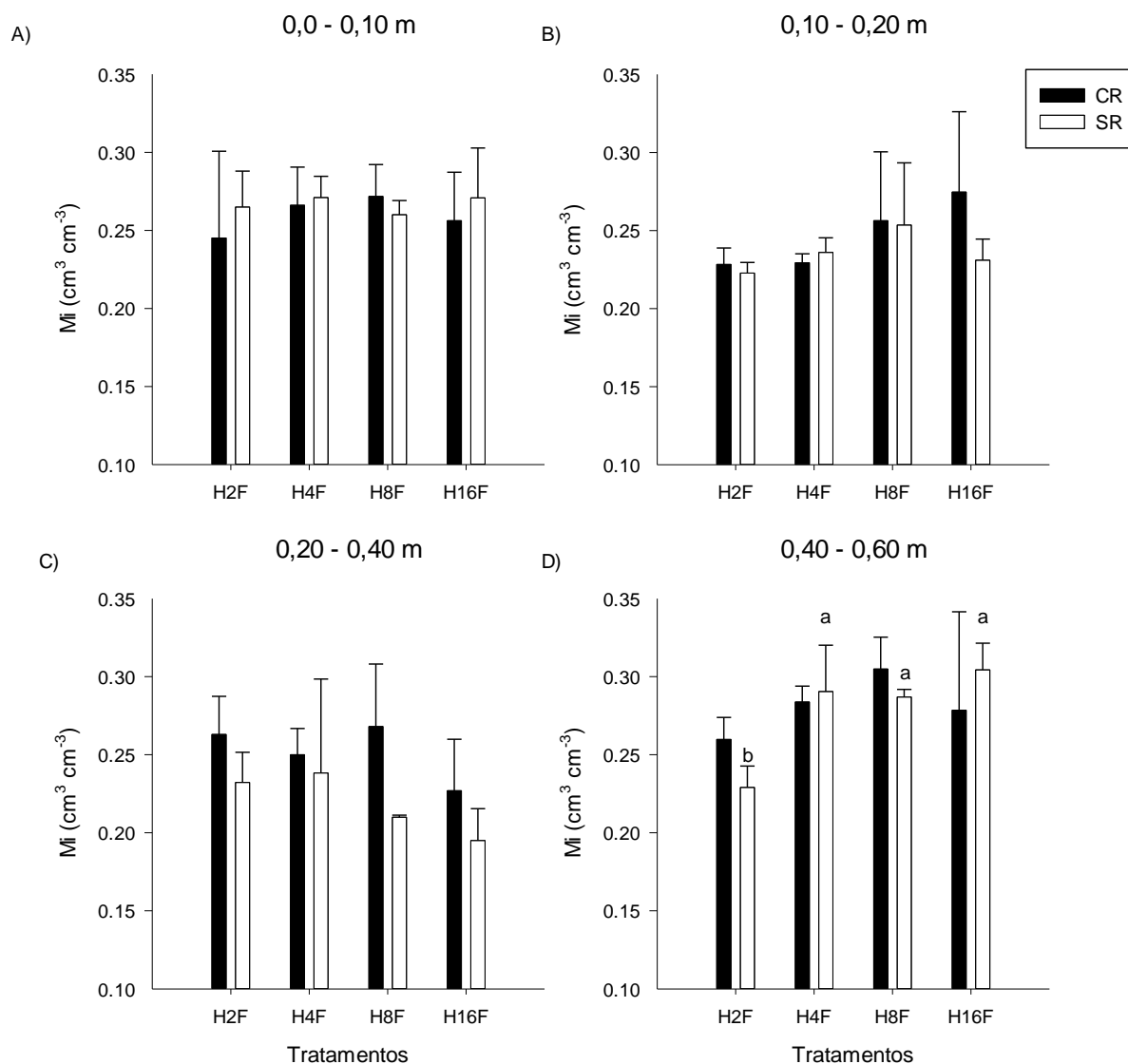
Figura 12 - Macroporosidade (Ma) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.



H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: não significativo. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros indicam o desvio padrão da média. Linha vermelha indica limite crítico.

Fonte: O Autor.

Figura 13 - Microporosidade (Mi) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.



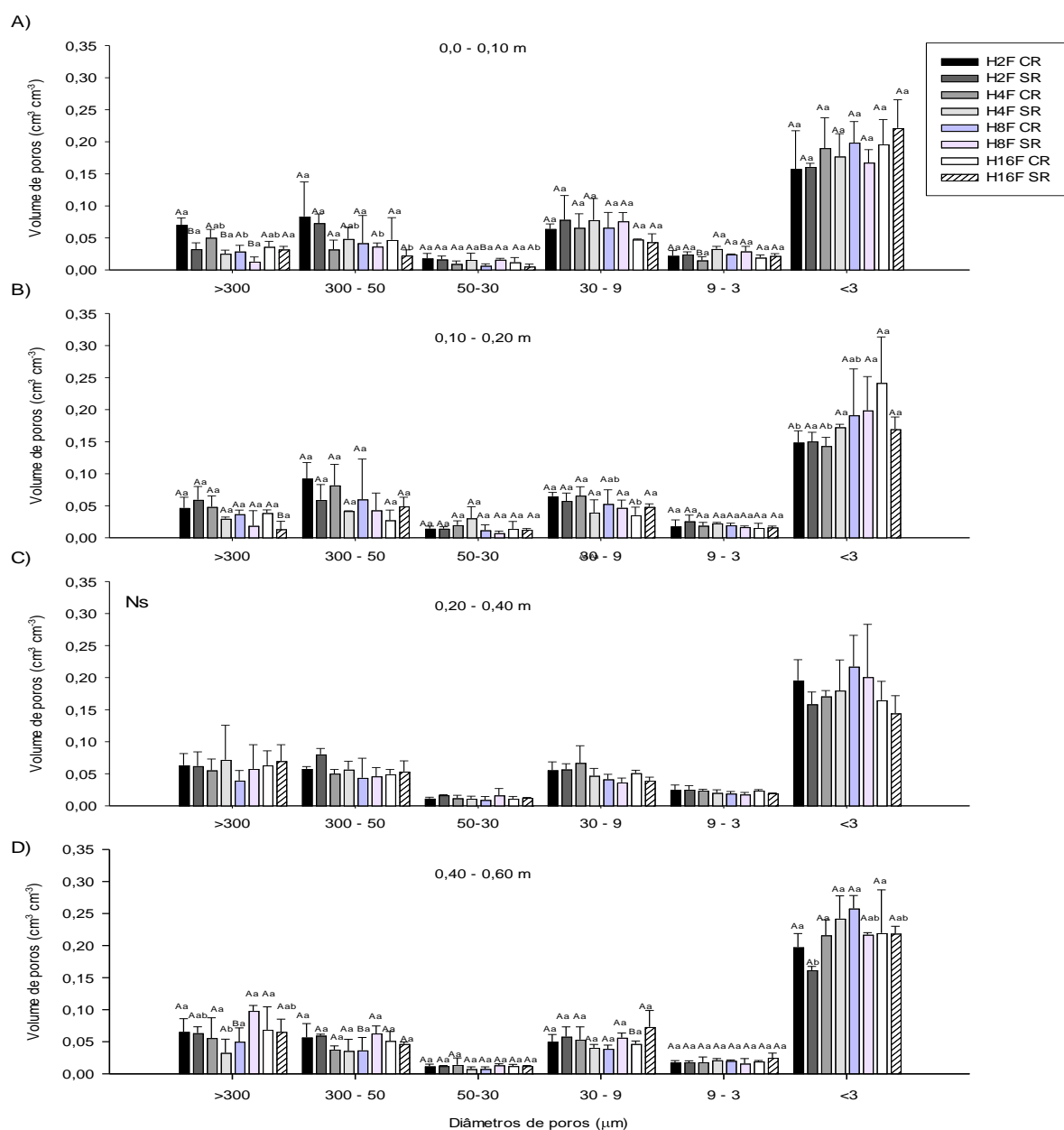
H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: não significativo. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros indicam o desvio padrão da média.

Fonte: O Autor.

A distribuição do tamanho de poros apresentou efeito significativo nas classes diamétricas  $>300 \mu\text{m}$  e  $30-9 \mu\text{m}$ , nas camadas 0,0-0,10 m a 0,10-0,20 m, respectivamente, para os tratamentos na presença da biomassa residual. Os tratamentos H8F e H16F tiveram, respectivamente, reduções na ordem de 141 e 85

% em relação ao tratamento H2F com menor número de passadas para classe de maior diâmetro (Figura 14A e B).

Figura 14 - Distribuição do tamanho de poros ( $\mu\text{m}$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, para as quatro camadas avaliadas.



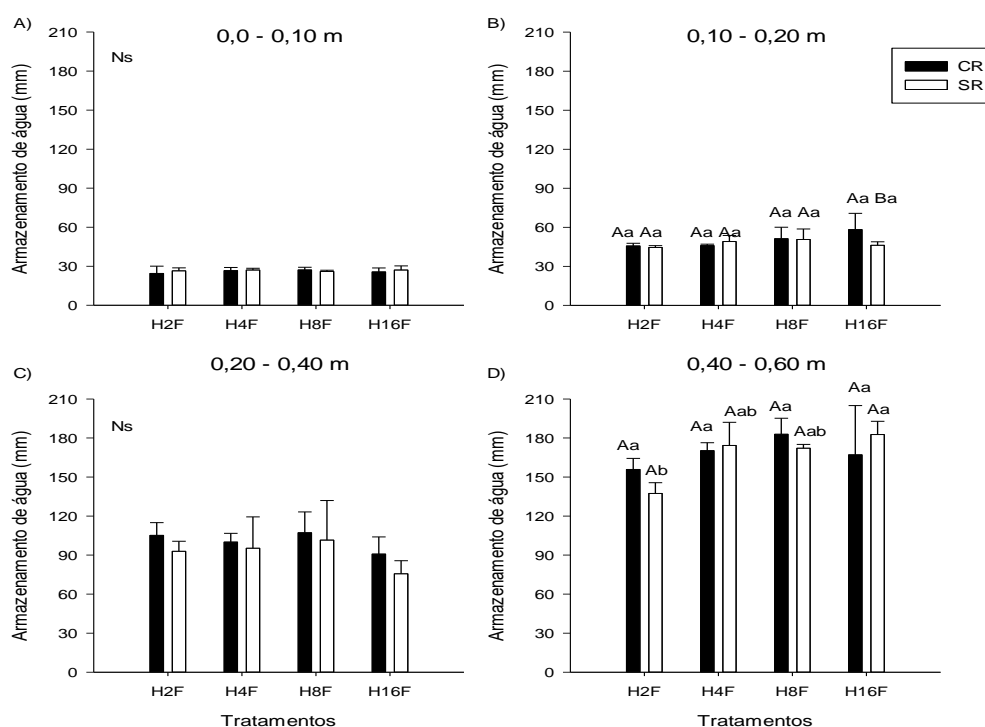
H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; CR: com resíduo e SR: sem resíduo; Ns: não significativo. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros mostram o desvio padrão da média.

Fonte: O Autor.

Para os tratamentos na ausência da biomassa residual houve efeito significativo das classes de diâmetros de poros  $> 50 \mu\text{m}$  para as camadas 0,0-10 m e 0,40-0,60 m. Para a camada mais superficial, o menor valor apresentado ocorreu com o maior número de passadas, enquanto na camada mais profunda foi verificado um comportamento inverso (Figura 14A e D).

O armazenamento de água no solo apresentou valores muito similares para todos os tratamentos na presença e ausência da biomassa residual (Figura 15), sendo significativo na camada 0,0-0,10 m para aporte do resíduo e na camada 0,40-0,60 m entre os tratamentos tendo o H2F o menor volume de armazenamento de água.

Figura 15 - Armazenamento de água do Argissolo Vermelho-Amarelo na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.



H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: não significativo. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros indicam o desvio padrão da média.

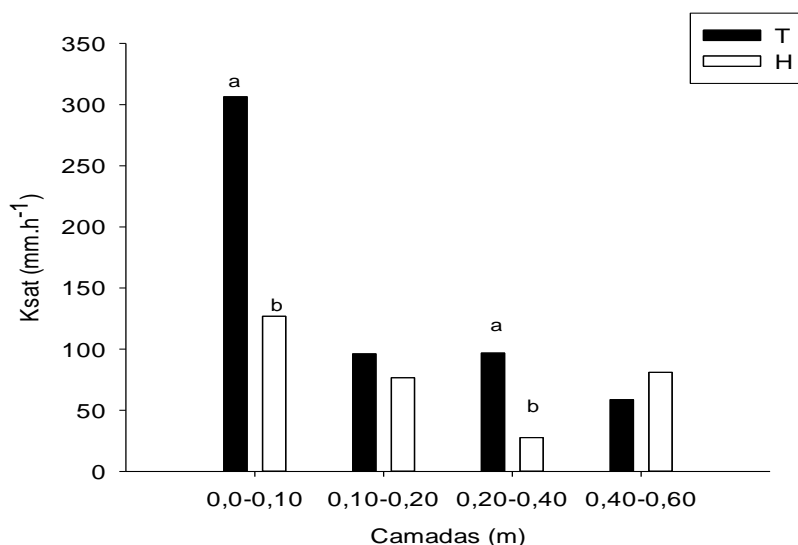
Fonte: O Autor.

## 6.3 PROPRIEDADES DE FUNCIONALIDADE DO SOLO

### 6.3.1 Corte

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) diminuiu do tratamento T para o tratamento H, com valores variando de 306 a 27  $\text{mm h}^{-1}$  (Figura 16). A camada de 0,0-0,10 m foi a mais expressiva na diferença de valores, onde T apresentou 306  $\text{mm h}^{-1}$  e H 126  $\text{mm h}^{-1}$ ; em seguida, a camada 0,20-0,40 m teve uma redução na ordem de 70% para H. Para a camada 0,10-0,20 m e 0,40-0,60 m não houve diferença significativa.

Figura 16 - Condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm h}^{-1}$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.

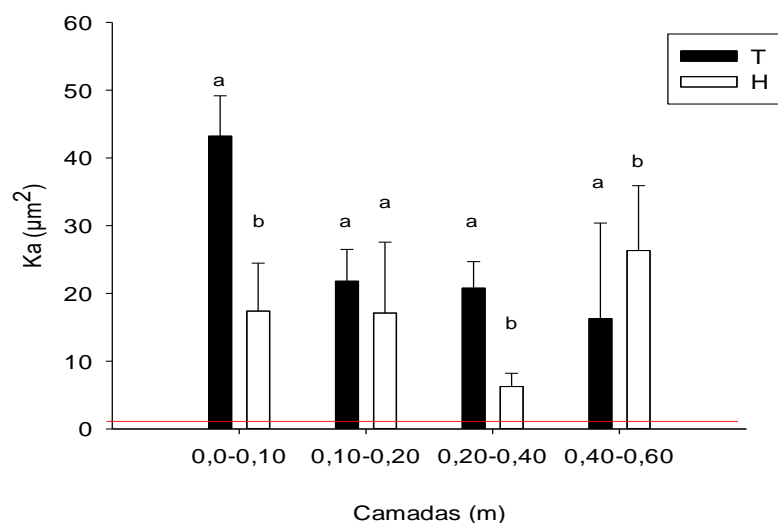


T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*. Letras minúsculas iguais entre os tratamentos dentro da camada não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: O Autor.

A permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) na tensão 10 kPa (Figura 17) foi reduzida significativamente nas camadas 0,0-0,10 e 0,20-0,40 m, em torno de 60% para esta primeira camada, e o valor de 20,77  $\mu\text{m}^2$  para T e 6,25  $\mu\text{m}^2$  para o H, respectivamente.

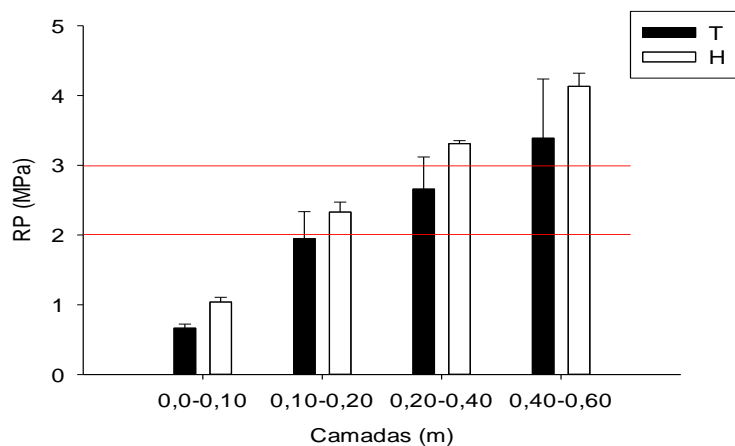
Figura 17 - Permeabilidade ao ar ( $K_a$ ,  $\mu\text{m}^2$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo no corte, submetido a tensão matricial ( $\Psi_m$ ) 10 kPa para as quatro camadas avaliadas.



T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*. Letras minúsculas iguais entre os tratamentos dentro da camada não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Linha vermelha indica limite crítico.  
Fonte: O Autor.

Os valores de resistência do solo à penetração (RP) foram maiores para o tratamento H. A RP variou de 0,66 a 4,12 MPa de T para H (Figura 18). Ocorreu incremento aos valores de RP para os dois tratamentos, na medida em que aumentou a profundidade, o que originou uma diferença na ordem de 20% para o tratamento H.

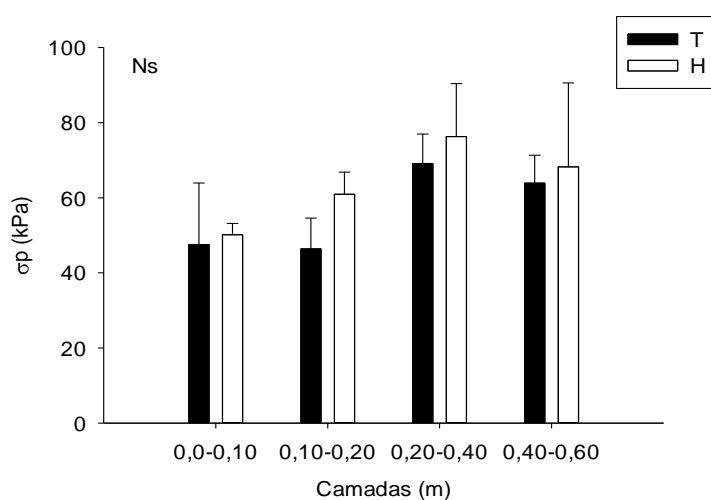
Figura 18 - Resistência do solo à penetração a campo (RP) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.



T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*. As barras de erros mostram o desvio padrão da média. Linha vermelha indica zona crítica.  
Fonte: O Autor.

Os valores de pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) diferiram nas camadas mais profundas 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, com um aumento na ordem de 29%, 18% e 19% para o tratamento H, respectivamente (Figura 19).

Figura 19 - Pressão de preconsolidação (kPa) do Argissolo Vermelho-Amarelo, no corte, para as quatro camadas avaliadas.



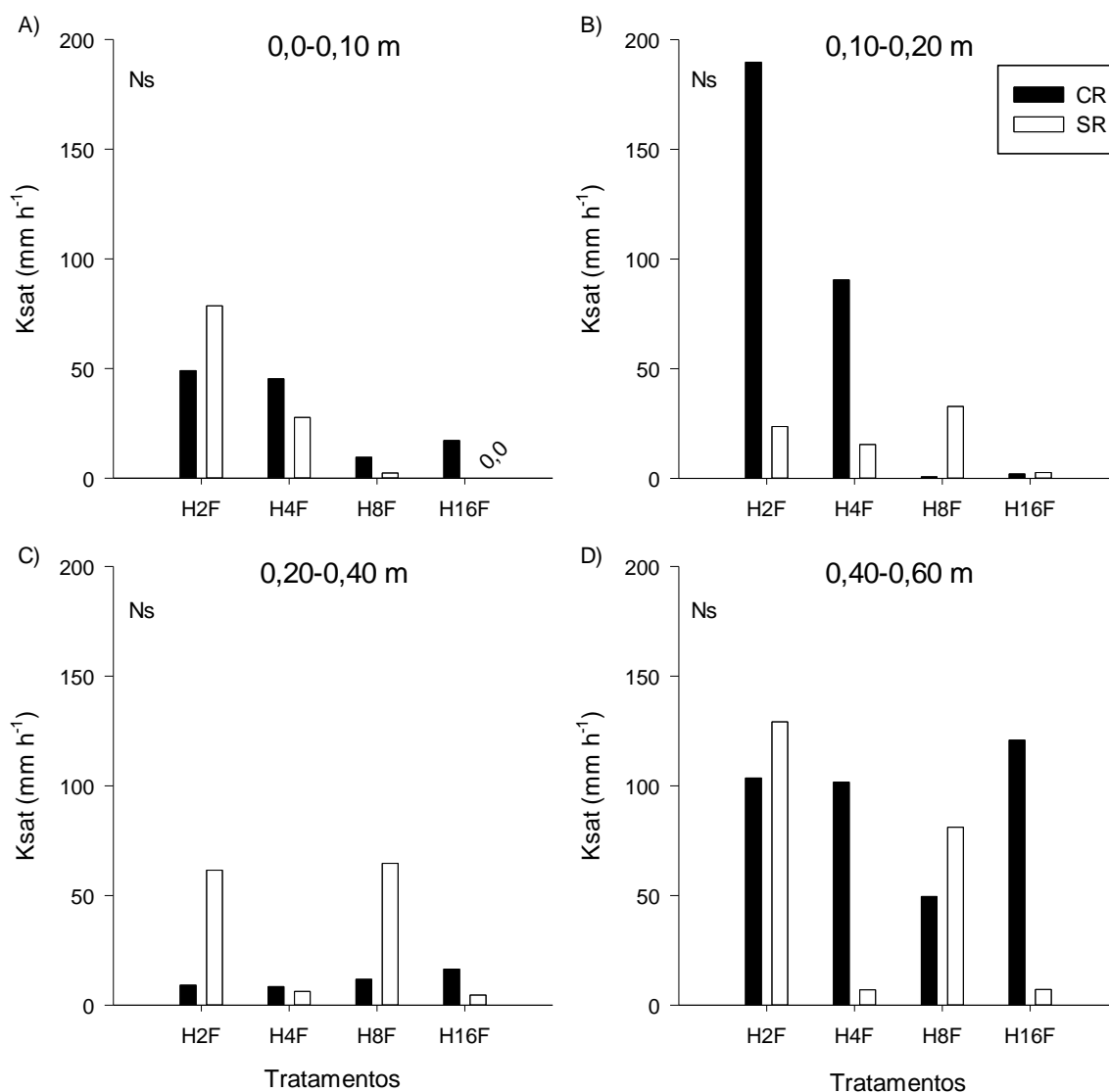
T: testemunha; H: 1 passada de *Harvester*; Ns: não significativo. As barras de erros mostram o desvio padrão da média.  
Fonte: O Autor.

### 6.3.2 Extração de madeira

A condutividade hidráulica de solo saturado ( $K_{sat}$ ) não apresentou diferença significativa entre os tratamentos (Figura 20 A, B, C e D). Os tratamentos H2F e H4F apresentaram os maiores valores de  $K_{sat}$  nas duas primeiras camadas, na presença da biomassa residual, cerca de 119 e 67  $\text{mm h}^{-1}$ , respectivamente. Com o aumento do número de passadas a  $K_{sat}$  apresentou tendência de redução com o aumento em profundidade.



Figura 20 - Condutividade hidráulica saturada ( $\text{mm h}^{-1}$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.

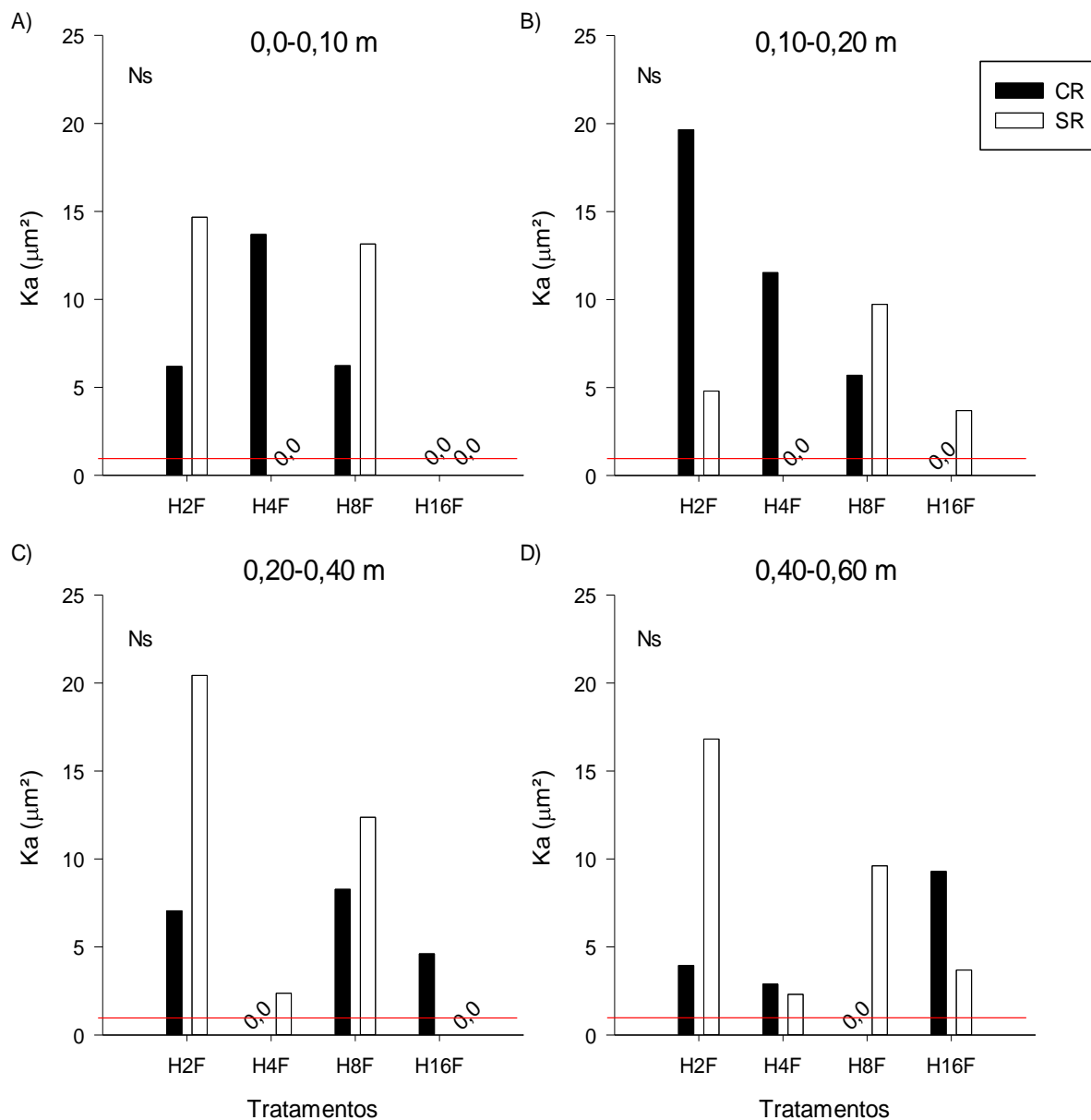


H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: não significativo.

Fonte: O Autor.

A permeabilidade do solo ao ar ( $K_a$ ) na tensão de 10 kPa (Figuras 21) não apresentou diferença significativa para os tratamentos dentro das camadas, embora ocorresse redução nos valores de  $K_a$  conforme ocorreu o aumento na intensidade de tráfego na presença e ausência da biomassa residual para todas as camadas.

Figura 21 - Permeabilidade ao ar ( $K_a$ ,  $\mu\text{m}^2$ ) do Argissolo Vermelho-Amarelo na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), na tensão 10 kPa para as quatro camadas avaliadas.

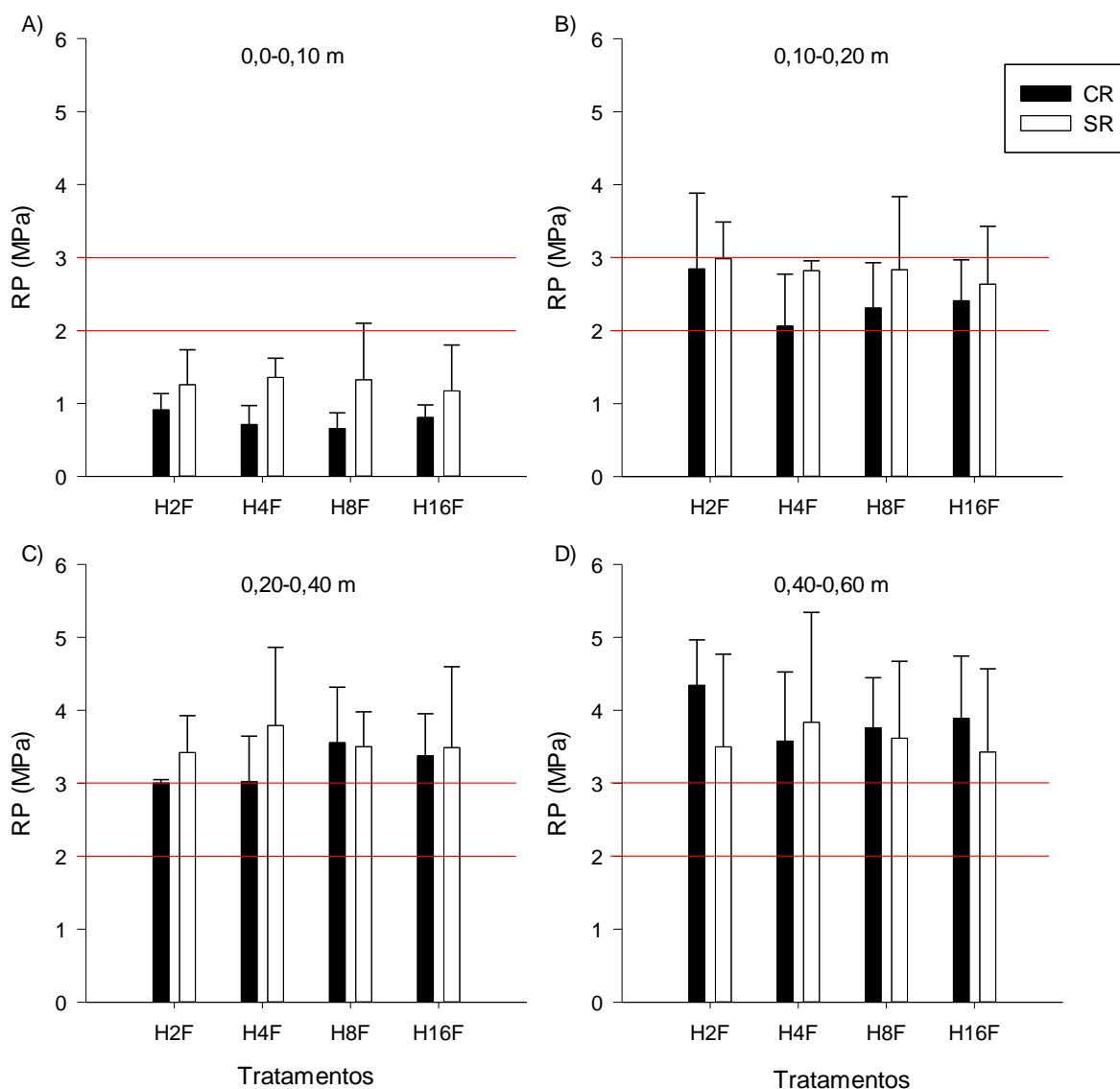


H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: Não significativo. Linha vermelha indica limite crítico.

Fonte: O Autor.

A resistência do solo à penetração (RP) apresentou diferença expressiva entre os tratamentos nas camadas mais profundas. Com maiores valores de RP obtidos para o H2F a 0,40-0,60 m de profundidade (Figura 22).

Figura 22 - Resistência do solo à penetração a campo do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.



H2F= 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F= 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*. As barras de erros mostram o desvio padrão da média. As linhas vermelhas indicam a zona crítica.

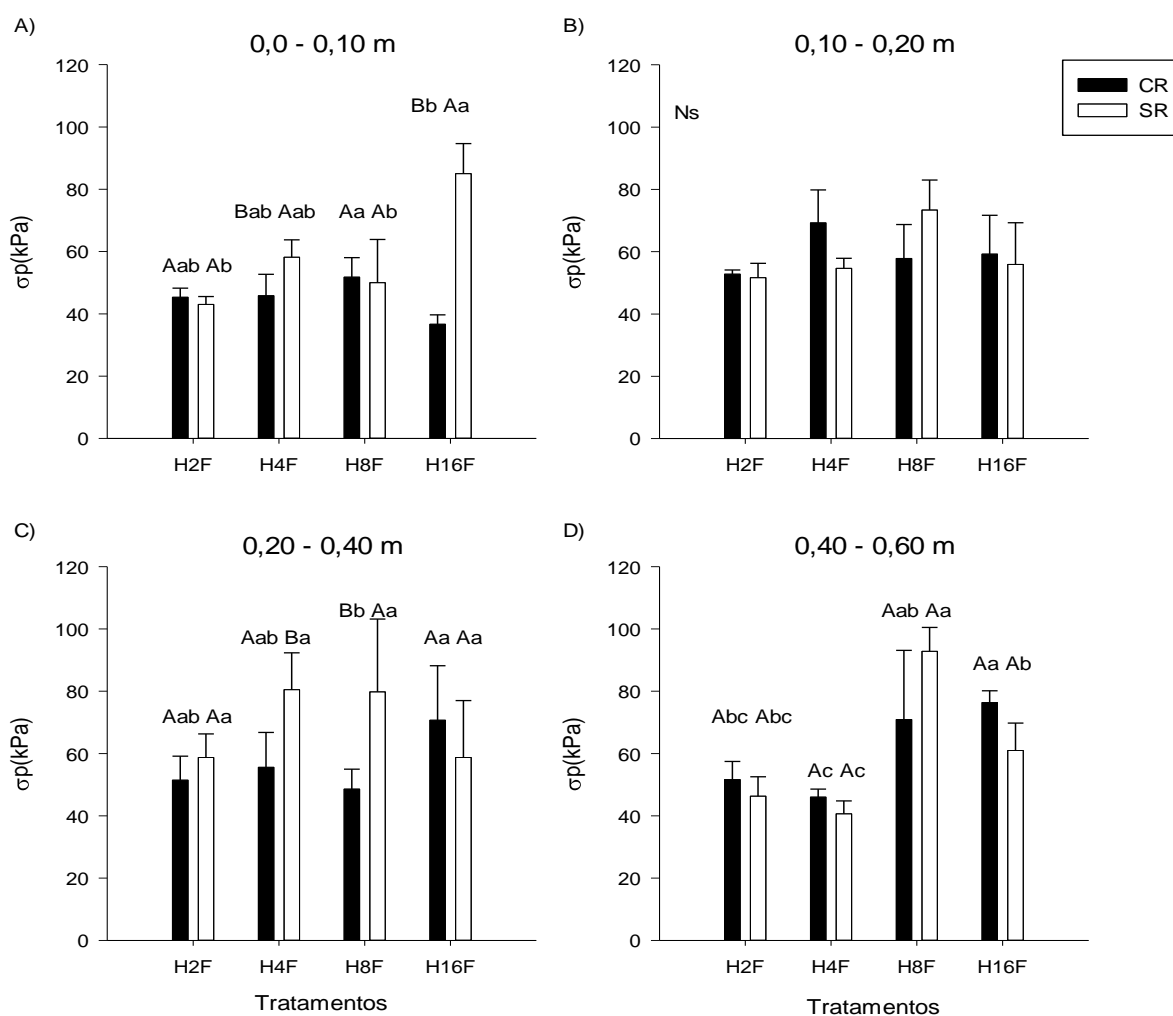
Fonte: O Autor.

A pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) apresentou efeito significativo para presença e ausência de resíduo na camada 0,0-0,10 m com apenas uma passada de

*Harvester* e duas passadas de *Forwarder* (H2F) foi possível observar alterações da estrutura do solo na presença e ausência da biomassa residual (Figura 23). Nas camadas 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, o tratamento H8F apresentou maior valor de  $\sigma_p$ , representado pelo maior número de passadas de tráfego com *Forwarder*.

Para a condição da ausência da biomassa residual os tratamentos H16F e H8F apresentaram um aumento de 49 e 56% na  $\sigma_p$  em relação à menor intensidade tráfego H2F nas camadas 0,0-0,10 e 0,40-0,60 m.

Figura 23 - Pressão de preconsolidação (kPa) do Argissolo Vermelho-Amarelo, na extração de madeira, com resíduo (CR) e sem resíduo (SR), para as quatro camadas avaliadas.



H2F: 1 passada de *Harvester* + 2 passada de *Forwarder*; H4F: uma passada de *Harvester* + 4 passada de *Forwarder*; H8F: uma passada de *Harvester* + 8 passada de *Forwarder*; H16F: 1 passada de *Harvester* + 16 passada de *Forwarder*; Ns: não significativo. Letras maiúsculas iguais no tratamento e minúsculas iguais entre os tratamentos diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). As barras de erros mostram o desvio padrão da média.

Fonte: O Autor.

## 7 DISCUSSÃO

### 7.1 ÁREA DE CONTATO, PRESSÃO DAS MÁQUINAS SOBRE O SOLO E CAMADA DE RESÍDUOS

O deslocamento de máquinas florestais na operação de colheita da madeira aplica, sobre o solo, tensões mecânicas diretamente abaixo do rodado. As tensões normais e cisalhantes aplicadas decorrem do movimento vertical e horizontal do solo (MION et al., 2016; GUIMARÃES JUNNYOR, 2019), resultante das relações entre a área de contato com as dimensões do diâmetro e largura dos rodados das máquinas, da pressão de inflação dos pneus, e da carga por eixo e por rodado (KELLER, 2005; ARAÚJO-JÚNIOR, ARAÚJO JÚNIOR, 2011).

O *Harvester* equipado com rodado de esteira apresentou valores de área de contato maiores que o *Forwarder* equipado com rodados de pneus (diagonal) e, à medida que aumentou o número de passadas deste último na trilha do rodado, a área de contato diminuiu. Pneus diagonais possuem a parte lateral do pneu rígida, o que impede que o pneu se molde no solo de acordo com as irregularidades do terreno e, por isso, a sua área de contato fica reduzida, aumentando a pressão na superfície do solo (SILVA et al., 2000).

O estado estrutural do solo é o principal agente desencadeador do impacto sobre as sucessivas intensidades de tráfegos das máquinas, uma vez que, inicialmente o solo apresentava maior porosidade total. Mas, com o aumento do número de passadas das máquinas, ocorreram alterações estruturais no solo, indicando a compressão da estrutura do solo, ou seja, o solo aumentou sua rigidez e reduziu área de contato rodado-solo (SILVA et al., 2000; STRECK et al. 2004), o que se reflete diretamente nos valores das pressões das máquinas. Além disso, os menores valores para os rodados dianteiros decorrem da distribuição do peso da máquina ter sido calculada com base em 40% para os rodados dianteiros e 60% para os traseiros sugerido por Schlosser (1997).

Ao avaliar a compactação do solo em colheita florestal em Cambissolo Háplico Distrófico de textura franco arenosa, Sampietro (2013) observou valores parecidos com os deste estudo. Isto é, o *Harvester*, com peso total de 23,3 Mg equipado com esteiras, apresentou uma pressão de 75,2 kPa, enquanto para o *Forwarder*, com

rodados de pneus e com peso de 25,4 Mg, a pressão foi equivalente a 77,4 e 90,6 kPa para uma passada, para os rodados dianteiros e traseiros, respectivamente. Para 32 passadas da máquina, aquele autor obteve pressões de 162,3 e 228,0 kPa para os rodados dianteiro e traseiros, respectivamente.

Ao avaliar o solo sobre o efeito do tráfego de máquinas, as camadas que compõem seu perfil são submetidas a pressões externas e dinâmicas que está ligada diretamente à ação da carga imposta pelo rodado (REICHERT, 2010; KELLER et al. 2014). Exemplificando, ao distribuir os deslocamentos e tensões atuantes pela passagem de um trator agrícola, Mion et al. (2016) observaram que a maior área de contato pneu-solo ocorreu nas menores pressões, decrescendo conforme o aumento da pressão interna do pneu.

Outro aspecto associado à pressão externa no solo por máquinas de colheita de madeira é ao aporte residual da biomassa florestal sobre o solo. Ao monitorar a compactação de um Latossolo Vermelho, Szymczak (2014) observou que o resíduo da colheita florestal foi efetivo para tornar mínima a compactação do solo originada pelo tráfego de máquinas. Isso deveu-se à disposição dos resíduos na superfície do solo, pois o mesmo atua distribuindo as pressões aplicadas pela intensidade de tráfego, de modo que a capacidade de suporte de carga do solo não seja excedida e, conseqüentemente, se reduz o efeito da compactação (BRAIDA et al., 2006, 2010). Porém, na ausência de biomassa residual como ocorre contato direto do rodado com o solo confere maior aproximação das partículas e, conseqüentemente, redução no tamanho de poros.

## 7.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

No corte e extração de madeira ocorreram efeitos negativos sobre as propriedades de composição e funcionais do solo, na medida que aumentou o número de passadas das máquinas de colheita da madeira. A Ds apresentou incrementos para todos os tratamentos. Alterações na estrutura do solo foram observadas após o tráfego do *Harvester* uma única vez, porém ficaram abaixo dos valores considerados restritivos ao crescimento radicular para solos franco-arenosos para culturas agrícolas, conforme Reichert et al. (2003), que é de 1,70 - 1,80 g m<sup>-3</sup>. Os menores valores de Ds e maiores valores de Pt observados para os tratamentos H2F, H4F, H8F e H16F, na primeira camada da extração, estão associados à manutenção da

biomassa residual sobre o solo, o qual pode ter atuado como um dissipador de pressão, distribuindo-a sobre o solo.

O valor médio da biomassa residual foi de 10,3 kg m<sup>-2</sup>, o qual em partes foi suficiente para amortizar o impacto da pressão sobre o solo para H2F, tratamento de menor tráfego. Porém, com o aumento do número de passadas foi observada diferença significativa, principalmente para o tratamento H16F (maior tráfego), indicando alteração na estrutura solo. Ao avaliar uma colheita mecanizada de pinus, Reichert et al. (2018) encontraram valores de biomassa residual entre 9,8 a 15,6 Mg ha<sup>-1</sup>, a qual não foi suficiente para dissipar a total pressão exercida pela pressão de carga sobre o solo, resultando em compactação. O efeito da compactação é dependente indiretamente da quantidade de resíduos vegetais sobre o solo (BRAIDA et al., 2006; REICHERT et al., 2016).

A diminuição do volume de Ma e da Pt foi confirmada pela distribuição tamanho de poros e armazenamento de água. Houve redução da classe > 50 µm, e predominância de poros com diâmetro <3 µm, para os tratamentos com maior quantidade de passadas das máquinas. Essas alterações promovidas pela compressão do solo não saturado podem levar à redução dos fluxos de água e ar do solo (STRECK, 2004; REICHERT et al., 2007). O impacto originado pelas passadas das máquinas, em solo de textura franco arenosa, foi significativo até a profundidade de 0,40 m com apenas uma passada do *Harvester* mais uma passada de *Forwarder*, por causar aumento na densidade do solo até 0,20 m e aumentar os poros de diâmetros de 10 a 3 µm com intenso tráfego (SAMPIETRO, 2013).

Considerando o valor de 0,10 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> de macroporosidade como limitante para o crescimento de plantas (TAYLOR; ASCROFT, 1972; HILLEL, 1998; REYNOLDS et al., 2009) e, possivelmente, para as trocas gasosas e hídricas, na presença de resíduos o número máximo de passadas seria duas passadas, para permitir a funcionalidade da primeira camada do solo (0,0-0,10 m) e de quatro passadas, se considerada a segunda camada (0,10-0,20 m). Contudo, na ausência de resíduos, esses valores seriam de menos de uma e duas passadas, respectivamente. Embora o preparo (subsolagem) para o próximo plantio rompa essas camadas mais superficiais, as áreas entre as linhas de preparo permanecerão com baixo volume de macroporos para a devida funcionalidade do sistema poroso. Esses

dados demonstram a importância de trafegar sobre os resíduos florestais no momento da extração e evitar a concentração de tráfego.

Como este solo é caracterizado como franco-argilo-arenoso (> 60% de areia) (Tabela 1), principalmente nas camadas mais superficiais, ocorre menor armazenamento de água, mesmo com o efeito da compactação e conversão da macro em microporosidade. A água será drenada para maiores profundidades ao longo do perfil, permanecendo retida na camada mais profunda do solo devido ao incremento em argila e, conseqüentemente, em microporos que favorecem a retenção de água com alta energia (KLEIN et al., 2006; SEVERIANO et al., 2010; CARDUCCI et al. 2011).

A Ksat e a Ka também foram alteradas por serem propriedades altamente relacionadas com a organização estrutural do solo. O tratamento H no corte e os tratamentos H8F e H16F na extração de madeira, sem biomassa residual, foram os que promoveram acentuada redução da Ksat e Ka, confirmadas pela redução na porosidade total e notadamente no volume de macroporos associados à compressão do solo, o que compromete a entrada e redistribuição de água no perfil do solo (SWEENEY et al., 2006; SAMPIETRO, 2013; HOLTHUSEN et al., 2018). Ainda que com o aumento do número de passadas na extração de madeira tenha reduzido a Ka para valores de 0 (zero) para alguns tratamentos, nos demais tratamentos há porosidade funcional, ou seja, poros disponíveis ao fluxo de gases no solo, pois a área disponível ao fluxo é maior que  $1 \mu\text{m}^2$ , valor que define o limite entre porosidade bloqueada e funcional (MCQUEEN; SHEPHERD, 2002).

A resistência do solo à penetração (RP) depende da densidade do solo e da umidade de referência (REICHERT et al., 2007; SAMPIETRO, 2013; REICHERT et al., 2016). Dessa forma, a RP aumenta quando ocorre incrementos na densidade e redução da umidade (REICHERT et al., 2007; LOPES et al., 2011; REICHERT et al., 2018). No presente estudo, a faixa de variação de RP para o corte e extração de madeira foi de 0,66 a 4,79 MPa. Considerando a faixa de valor crítico para o desenvolvimento radicular de 2 MPa a 3 MPa para eucalipto (DEDECEK; GAVA, 2005), os valores dos tratamentos na primeira camada de avaliação ficaram abaixo da zona crítica, mas observou-se um aumento progressivo associado ao número de passadas na ausência da biomassa residual até a camada 0,10-0,20 m.



A partir da camada 0,20-0,40 m os valores foram elevados. Esse aumento da RP, com o incremento na profundidade, está associado a fatores pedogenéticos resultantes da evolução do solo que podem resultar no adensamento das camadas subsuperficiais do solo (PINCELLI, et al. 2014). Isso ocorre principalmente pela mobilização de materiais mais finos da superfície e preenchimento de poros em camadas inferiores (CAMARGO; ALLEONI, 2006), o que pode elevar os valores de RP, Mi e armazenamento de água em profundidade, caso específico dos Argissolos, objeto deste estudo.

Os valores obtidos da pressão de preconsolidação ( $\sigma_p$ ) no corte e extração de madeira foram próximos ou abaixo daqueles obtidos da pressão exercida pelas máquinas sobre o solo, o que leva à ocorrência de deformação adicional. Essa deformação irá variar com o estado de compactação que o solo se encontra, além do conteúdo de água e tipo de estrutura (SILVA et al., 2002). Como as amostras foram equilibradas na capacidade de campo (10 kPa), há 30% de conteúdo de água durante a realização do teste, o que pode ter originado a diminuição da coesão entre as partículas e redução do suporte de carga pela menor  $\sigma_p$ .

Com apenas uma passada do *Harvester*, de modo geral, houve redução do espaço poroso do solo, já confirmadas pela  $D_s$ ,  $M_a$  e distribuição do tamanho de poros. Para extração de madeira, também é observado o mesmo comportamento em relação às maiores passadas, porém até a camada 0,10-0,20 m. Assim, ao associar as propriedades de composição do solo com as de funcionalidade do solo, a compressão causada pelo número de passadas das máquinas pode ser benéfica por promover a redução da macroporosidade, principalmente no armazenamento de água em profundidade.

## 8 CONCLUSÃO

A compressão do solo oriunda do corte (*Harvester*) e extração de madeira (*Forwarder*) foi mais intensa na camada mais superficial do solo para os tratamentos com maior número de passadas. Não obstante, alterações nas propriedades do solo podem ocorrer inclusive na camada mais profunda avaliada (0,40-0,60 m), podendo as mesmas serem consideradas benéficas para o armazenamento de água em profundidade.

Recomenda-se o tráfego sobre o manejo do resíduo, afim de amortizar a pressão do rodado-solo. O limite do número de passadas do *Forwarder* numa mesma linha, dependendo da profundidade considerada, compreende entre duas e quatro passadas na presença de resíduos, enquanto na ausência de resíduos esse limite é de apenas duas passadas.

## REFERÊNCIAS

- AJAYI, A. E.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CURI, N.; ARAÚJO JÚNIOR, C. F.; ALADENOLA, O. O.; SOUZA, T. T. T.; INDA JÚNIOR, A. V. Aplicação de diferentes métodos para estimar a resistência de cinco solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.487-495, 2009.
- AMBUS, J. V.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; FACCIO CARVALHO, P. C. Alterações na composição e propriedades funcionais do solo no sistema integrado de plantio direto de longo prazo. *Geoderma*, v.330, p.232-243, 2018.
- ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S. Modelagem das tensões verticais aplicadas ao solo por um trator cafeeiro para predição da compactação. In: **XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, Uberlândia-MG, 2011.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M. D.; REINERT, D. J. Resíduos Vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.605-614, 2006.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.131-139, 2010.
- BRANDT, A. A. **Carregamento estático e dinâmico e sua relação com tensão, deformação e fluxos no solo**. 2009. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2009.
- CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. Causas da compactação do solo. 2006.
- CASAGRANDE, A. **Determination of the preconsolidation load and its practical significance**. In: Proceedings of the International Conference on the Soil Mechanics and Foundation Engineering. Cambridge: Harvard University, 3:60-64, 1936.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a Equação Duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.77-86, 2011.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.K. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p.1663-1674, 2006.
- CUNHA J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia Agrícola**, v.10, p.573-81, 2002.
- DIAS JUNIOR, M. S.; BERTONI, J. C.; BASTOS, A. R. R. **Física do solo teórica**. Curso de pós-graduação em solos e nutrição de plantas. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2000, 149p.

DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; SILVA, A. R.; FERREIRA, D. F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, v.23, n.4, p.371-380, 1999.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v.29, n.3, p.383-390, 2005.

ELIASSON, L.; WÄSTERLUND, I. Effects of slash reinforcement of strip roads on rutting and soil compaction on a moist fine-grained soil. **Forest Ecology and Management**, v.252(1-3), p.118-123, 2007.

FAO. **Energy conservation in the mechanical forest industries**. Roma: FAO, 1990. 130 p.

FAO. **Global Forest Resources Assessment**. FAO Forestry Paper n.1. 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, v.35(6), p.1039-1042, 2011.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BULL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.1, p.49-57, 2006.

GARDNER, R. H.; MANKIN, J. B. Analysis of biomass allocation in forest ecosystems of the IBP. In: REICHLE, P. D. **Dynamic properties of forest ecosystems**. Cambridge, Cambridge University Press. cap.8, p.451-497. 1981.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. **Australian Journal of Soil Research**, v.18, n.2, p.163-189, 1980.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para a determinação da densidade de partícula do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, v.36, p.664-668, 2006.

GUBIANI, P.I.; GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1502-1511, 2013.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; GOULART, R. Z.; FONTANELA, E. Suplemento excel para modelar a curva de compressão do solo. Anais: **XX Congresso Latinoamericano y XVI Congreso Peruano de la Ciencia del Suelo**, Cusco, Peru. 2014a.

GUBIANI, P.I.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Valores críticos de densidade do solo avaliados por condições de contorno. **Ciência Rural**, v.44, p.994–1000, 2014b.

GUIMARÃES JÚNNYOR, W. S.; DISERENS, E.; DE MARIA, I. C.; ARAUJO-JUNIOR, C. F.; FARHATE, C. V. V.; SOUZA, Z. M. Prediction of soil stresses and

compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. **Science of the Total Environment**, v.681, p.424-434, 2019.

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

HOLTHUSEN, D.; BRANDT, A. A.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared no-tillage cropping. **Journal Soil and Tillage Research**, v.177, p.113-124, 2018.

HORN, R, KUTILEK, M. The intensity-capacity concept-how far is it possible to predict intensity values with capacity parameters. **Journal Soil and Tillage Research**, v.103, p.1-3, 2009.

HORN, R.; PETH, S. **Mechanics of Unsaturated Soils for Agricultural Applications**, 2011.

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - **Relatório Anuário Estatístico da IBÁ - Ano base 2019**. Brasília 2019, 80p.

KELLER, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. **Biosystems Engineering**, London, v. 92, n.1, p.85-96, 2005.

KELLER, T.; LAMANDE, M.; ARVIDSSON, J.; BERLI, M.; RUIZ, S.; SCHJONNING, P.; SELVADURAI A. P. S. Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: comparing measurements with simulations. **Soil and Tillage Research**, v.140, p.106-117, 2014.

KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; SCHJØNNING, P.; DEXTER, A. R. Analysis of soil compression curves from uniaxial confined compression tests. **Geoderma**, v.163, p.13–23, 2011.

KOOISTRA, M.J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F.R.; VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M. Root soil contact of maize as measured by a thin-section technique. II. Effects of soil compaction. **Plant and Soil**, v.138, p.119-129, 1992.

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

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.71-78, 2012.

LOPES, E.S.; SAMPIETRO, J.A.; LOMBARDI, K.C. & DIAS, A.N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. **Revista Árvore**, v.35, p.659-667, 2011.

MACHADO, C. C.; SILVA, E. N. D.; PEREIRA, R. S.; CASTRO, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: MACHADO, C. C. (Ed.). **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014. p.15-45.

MARTINELLI, L. A.; MOREIRA, M. Z.; BROWN, I. F.; VICTORIA, R. L. Incertezas associadas às estimativas de biomassa em florestas tropicais: o exemplo de uma floresta situada no estado de Rondônia. In: **Seminário Emissão x Sequestro de CO<sub>2</sub>**. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, 1994. 221p.

MCQUEEN, D. J.; SHERPHERD, T. G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Thiptyc Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil Tillage & Research**, v.63, n.3-4, p.93-107, 2002.

MORDHORST, A.; ZIMMERMANN, I.; PETH, S.; HORN, R. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem. **Soil Tillage & Research**, v.125, p.3-13, 2012.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretária da Agricultura – Div. Terras e Colonização, 1961.

MION, R. L.; DE HOLANDA, A. S.; BARROSO, S. H. DE A. Soil tension from different pressures caused by farm tractor tires. **Engenharia Agrícola**, v.36(1), p.63-77, 2016.

NUNES, A. H. B. **Compressibilidade e resistência ao cisalhamento de um latossolo cultivado com eucalipto**. 2010. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PEREIRA, A. L. N.; LOPES, E. S.; DIAS, N. A. Análise técnica e de custo do feller buncher e skidder na colheita de madeira em diferentes produtividades do povoamento. **Ciência Florestal**, v.25, n.4, p.981–989, 2015.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; SEIXAS, F.; NUNES, R. Compactação e fertilidade do solo após a colheita do eucalipto, utilizando feller buncher e skidder. **Cerne**, v.20(2), p.191-198, 2014.

REICHERT, J. M.; BRANDT, A. A.; RODRIGUES, M. F.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Load dissipation by corn residue on tilled soil in laboratory and field-wheeling conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.98, n.8, p.2705-2714, 2016.

REICHERT, J. M.; CECHIN, N. F.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. F.; SUZUKI, L. E. A. S. Ground-based harvesting operations of *Pinus taeda* affects structure and pore functioning of clay and sandy clay soils. **Geoderma**, v.331, p.38–49, 2018.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. **Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação**, 2007, 86p.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. Van Lier QJ. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.29-102, 2010.

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**, v.102, p.242-254, 2009.

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

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v.152(3-4), p.252-263, 2009.

ROBERT, R. C. G. **Guia prático de operações florestais na colheita de madeira**. 1 ed. Curitiba: Ed. Do Autor, 2012. 112p.

ROMERO, E. M.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; COSTA, L. M. Condutividade hídrica, porosidade, resistência mecânica e intervalo hídrico ótimo em latossolo artificialmente compactados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p. 1004, 2014.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M. & CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.821-828, 1999.

SAMPIETRO J. A.; LOPES, E. S. Compactação de um Cambissolo e Neossolo submetidos a diferentes intensidades de tráfego de Feller Buncher e Skidder. **Scientia Forestalis**, v.39, n.90, p.265-272, 2011.

SAMPIETRO, J.A.; LOPES, E. S. Compactação de um cambissolo causada por máquinas de colheita florestal espacializada com geoestatística. **Floresta**, v 46, p.307, 2016.

SAMPIETRO, J. A. **Propriedades mecânicas e trafegabilidade de solos em plantios florestais**. 2013. 233p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

SAMPIETRO, J.A.; LOPES, E. D. S.; REICHERT, J. M. Compactação causada pelo tráfego de Feller Buncher e Skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, v.25, 2015.

SANTOS, D. W. F. N.; VALENTE, D. S. M.; FERNANDES, H. C.; FORASTIERE, P. R.; SILVA R. M. F. Análise técnica e econômica do *Harvester* operando em dois subsistemas de colheita de madeira. **Engenharia na Agricultura**, v. 24, n.6, p. 484-490, 2016.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s.n.], 2002, p. 119-140.

SCHLOSSER, J. F. **Motores e tratores agrícolas**. Caderno didático. Departamento de Engenharia Rural - Universidade Federal de Santa Maria, RS. 1997. 76p.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D.; SOUZA, C. R. Efeito da camada de resíduos florestais na compactação do solo causada pelo transporte primário da madeira. **Scientia Forestalis**, v.54, n.3, p.9-16, 1998.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CASTRO, M. B.; OLIVEIRA, L. F. C.; COSTA, K. A. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.3, p.404-413, 2010.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.4, p.239- 249, 2000.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Fatores controladores da compressibilidade de um argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico e de um latossolo Vermelho Distrófico Típico. II - Grau de saturação em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.9-15, 2002.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Soil temperature variation in three different systems of soil management in blackbeans crop. **Revista Brasileira Ciencia do Solo**, v.30, p.391-399, 2006.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira Ciencia do Solo**, v.33, p.1097-1104, 2009.

SILVA, C. B.; SANT'ANNA, C. M; MINETTI, L. J. Avaliação ergonômica do "fellerbuncher" utilizado na colheita de eucalipto. **Revista Cerne**, v.9, n.1, p.109-118, 2003.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H. S.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, v.38(1), p.185-206, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 149p.



SWEENEY, D. W.; KIRKHAM, M. B.; SISSON, J. B. Crop and soil response to wheel-track compaction of a claypan soil. **Agronomy Journal**, v.98, p.637-643, 2006.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.755–760, 2004.

SZYMCZAK, D. A.; BRUN, E. J.; REINERT, D. J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C. C.; DAL'COL LÚCIO, A.; MARAFIGA, J. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v.38(4), p.641-648, 2014.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology - The physics of irrigated and non irrigated soils**. San Francisco, W.H. Freeman and Company, 1972. 532p.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, New York, v.102, p.18-22, 1966.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA A.; TEIXEIRA W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**, 3rd ed., Brasília: Embrapa, 2017, 573 p.

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

VOSSBRINK, J. **Bodenspannungen und Deformationen in Waldböden durch Ernteverfahren**. Schriftenreihe (Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde) - Christian Albrechts Universität Kiel, Kiel, 2004. 63f.

WARKOTSCH, W. The impact of harvesting operation on timber quality: causes and remedies. **South African Forestry Journal**, n.169, 1994.

WÄSTERLUND, I. Environmental aspects of machine traffic. **Journal of terramechanics**, v.31 (5), p.265-277, 1994.