

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE COMPACTAÇÃO E  
DESCOMPACTAÇÃO EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO  
NO CENTRO-SUL DO PARANÁ**

**Marcelo Raul Schmidt**  
**(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE COMPACTAÇÃO E  
DESCOMPACTAÇÃO EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO  
NO CENTRO-SUL DO PARANÁ**

MARCELO RAUL SCHMIDT  
Engenheiro Agrônomo (UNIPAMPA)  
Mestre em Ciência Do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um  
dos requisitos à obtenção do  
Grau de Doutor em Ciência do  
Solo

Porto Alegre (RS) Brasil  
Agosto de 2022

## CIP - Catalogação Na Publicação

Schmidt, Marcelo Raul  
DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE COMPACTAÇÃO E DESCOMPACTAÇÃO  
EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO NO  
CENTRO-SUL DO PARANÁ / Marcelo Raul Schmidt. -- 2022.  
149 f.  
Orientador: Renato Levien.

Coorientador: Cimélio Bayer.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do RioGrande  
do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,  
2022.

1. : Plantio direto. 2. Compactação. 3.  
Escarificação. 4. Sistemas de preparo. I. Levien,  
Renato, orient. II. Bayer, Cimélio, coorient. III.  
Titulo.

MARCELO RAUL SCHMIDT  
Engenheiro Agrônomo - UNIPAMPA  
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

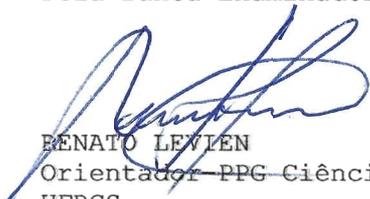
## TESE

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### **DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO**

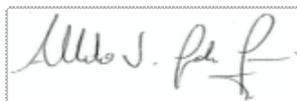
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 26 de agosto de 2021  
Pela Banca Examinadora



BENATO LEVLEN  
Orientador PPG Ciência do Solo  
UFRGS

Homologado em: 25 de julho de 2022  
Por



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo

CIMÉLIO BAYER  
Coorientador - PPG Ciência do Solo  
UFRGS

DOUGLAS RODRIGO KAISER  
PPG Ambiente e Tecnologias Sustentáveis/UFRGS  
(Plataforma MConf UFRGS)

LUIS EDUARDO AKIYOSHI SANCHES SUZUKI  
PPG Recursos Hídricos/UFPel  
(Plataforma MConf UFRGS)



MICHAEL MAZURANA  
PPG Ciência do Solo/UFRGS  
(Plataforma MConf UFRGS)

CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*Dedico este trabalho aos principais responsáveis por todas minhas conquistas. Meus pais: **Claudio e Sirlei***

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores Dr. Renato Levien e Dr. Cimélio Bayer, que foram respectivamente meu orientador e coorientador. Sempre auxiliando em tudo que foi necessário, ajudando na compreensão dos resultados obtidos.

A Me. Sandra Mara Vieira Fontoura e o Eng. agrônomo Renato Paulo de Moraes, funcionários da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, que não mediram esforços para ajudar no desenvolvimento da pesquisa, bem como demais funcionários.

A Juarez Roque Perin, Eng. agrônomo da Agropecuária Santa Clara onde foi implantado o experimento de campo, sempre auxiliando no que foi necessário, bem como os demais funcionários.

A Fundação Agrisus que disponibilizou auxílio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Relação Solo-Máquina, Leonardo, Sofia, Cícero e, principalmente, Tiago, que participaram de várias atividades, tanto de campo, quanto acadêmicas.

Aos meus pais e minha avó que sempre foram os principais professores, me dando apoio, educação, e conselho, sendo minha base forte nos momentos mais difíceis, bem como pela ajuda financeira e paciência.

A minha noiva Maria Fernanda, que surgiu em minha vida num momento bastante árduo, trazendo de volta minha inspiração e tornando meus dias mais felizes.

Aos amigos João, Johann e Tiago. Pelas ajudas e também momentos de descontração.

Aos amigos César, Lucas, Ricardo e Vítor. Pessoas importantes nesta caminhada.

A UFRGS pela oportunidade, a CAPES pelo auxílio financeiro durante o Curso.

# DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE COMPACTAÇÃO E DESCOMPACTAÇÃO EM SOLOS SOB PLANTIO DIRETO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ<sup>(1)</sup>

Autor: Eng<sup>o</sup>. Agr<sup>o</sup>. Me. Marcelo Raul Schmidt

Orientador: Prof. Dr. Renato Levien

Coorientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

## RESUMO

Com a expansão das áreas em plantio direto, aumenta-se a preocupação com a compactação do solo, principalmente pela redução de produtividade e problemas ambientais. Desta forma os desafios são diagnosticar o nível de compactação do solo e definir práticas para a descompactação dele. Os objetivos do estudo foram: verificar o efeito de diferentes sistemas de culturas, níveis de compactação e sistemas de preparo sobre parâmetros do solo e produtividade das culturas; determinar limites críticos de parâmetros físicos do solo para o crescimento de culturas agrícolas. Em março de 2018 implantou-se um experimento de campo em um Latossolo Bruno, em Candói-PR, onde por meio da aplicação de cargas foram definidos três níveis de compactação. Além disso, foram estudados três sistemas de preparo do solo e quatro sistemas de culturas. O experimento de campo foi conduzido durante três anos e foram analisados parâmetros de solo e de culturas. Os níveis de compactação só reduziram a produtividade de biomassa de milho na primeira safra. O consórcio de aveia+nabo apresentou maior produtividade na área escarificada e a soja não respondeu a nenhum dos tratamentos estudados. Quanto aos parâmetros do solo, estes foram mais sensíveis aos tratamentos aplicados, sendo que, de forma geral, os valores mais adequados ao crescimento das plantas, foram verificados nas áreas onde os níveis de compactação foram menores, com maior mobilização e com sistemas de culturas mais diversificados. No entanto, na área com baixo nível de compactação, a mobilização não proporcionou melhorias ao solo. O uso da haste sulcadora tem capacidade de melhorar parâmetros do solo, principalmente na camada de 0,10 - 0,20 m. As alterações causadas pelas práticas mecânicas aconteceram em curto prazo, enquanto as proporcionadas pelos sistemas de cultura são mais lentas. Em relação ao segundo estudo, encontrou-se boa relação entre os teores de argila, matéria orgânica e densidade máxima dos solos, possibilitando utilizar um modelo de diagnóstico de compactação pela determinação da densidade em solos da região.

Palavras-chave: Plantio direto, compactação, escarificação, sistemas de preparo

---

<sup>(1)</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (128p.) Agosto, 2021. Trabalho financiado com o apoio financeiro da CAPES e da Fundação Agrisus.

# **DIAGNOSIS OF THE COMPACTION STATUS AND DESCOMPACTION IN SOILS UNDER NO TILLAGE SYSTEM IN THE SOUTH CENTER OF PARANÁ<sup>(2)</sup>**

Author: Agron. M. Marcelo Raul Schmidt

Adviser: Prof. PhD. Renato Levien

Co-advisor: Prof. PhD. Cimélio Bayer

## **ABSTRACT**

With the expansion of areas under no-tillage, the concern with compaction increases, especially when relating it to productivity reduces and environmental problems. Thus, the challenges are to diagnosis soil compaction and define practices to decompaction. The aims of the study were to verify the effect of different crop systems, compaction levels and tillage systems on soil parameters and crop yield, and in the second study to determine critical limits of soil parameters for crop development in order to help in the diagnosis of compaction in the Center-South region of Paraná. In March 2018, a field experiment was implemented in an Oxisol in Cândói-PR, where 3 levels of compaction were defined through the application of loads, and 3 soil tillage systems and 4 different cropping systems were also studied. The field experiment was conducted for three years, soil and crop parameters were analyzed. The compaction levels only reduced the millet biomass productivity in the first crop, the oat+turnip intercropping showed higher productivity in the chiseled area, the soybean did not respond to any of the studied treatments. About soil parameters, these were more sensitive to the treatments applied, and in general the the most suitable values for the plants development, were found in areas without compaction, with greater mobilization and with more diversified crop systems, however in the area without compaction, the mobilization did not provide improvements on the ground. The use of the chisel plow has the ability to improve soil parameters, especially in the 0,10 - 0,20 m layer. Changes caused by mechanical practices are instantaneous, while those caused by culture systems are slower. In relation to the second study, a good relationship was found between clay, organic matter and maximum bulk density in the region, so these values can be used with good precision in the diagnosis of compaction status.

Keywords: No-tillage, compaction, chiseling, tillage systems

---

<sup>(2)</sup> Doctoral Thesis in Soil Science. Graduate Program in Soil Science, Faculty of Agronomy, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (128p.) August, 2021. Research supported by CAPES and Agrisus foundation.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Compactação do solo.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2. Causas da compactação do solo .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3. Diagnóstico do estado de compactação do solo.....</b>	<b>7</b>
2.3.1. Densidade e porosidade .....	7
2.3.2. Resistência do solo à penetração .....	8
2.3.3. Fluxo de água no solo .....	9
2.3.4. Permeabilidade ao ar .....	10
<b>2.4. Mitigação da compactação do solo.....</b>	<b>11</b>
2.4.1. Mitigação da compactação por práticas mecânicas .....	11
2.4.2. Mitigação da compactação por práticas vegetativas .....	12
<b>3. HIPÓTESES.....</b>	<b>14</b>
<b>4. OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>15</b>
<b>4.1. Objetivos específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
<b>5.1. Localização e caracterização do experimento .....</b>	<b>16</b>
<b>5.2. Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos.....</b>	<b>18</b>
<b>5.3. Linha do tempo das análises realizadas.....</b>	<b>22</b>
<b>5.4. Amostragem de solo .....</b>	<b>24</b>
<b>5.5. Determinações físicas .....</b>	<b>25</b>
5.5.3. Porosidade do solo.....	26
5.5.4. Densidade do solo.....	27
5.5.5. Permeabilidade ao ar .....	28
5.5.6. Retenção e disponibilidade de água no solo.....	28
5.5.7. Resistência à penetração do solo .....	29
5.5.8. Ensaio de Proctor normal.....	29
5.5.9. Resiliência do solo .....	30
<b>5.6. Avaliações das culturas .....</b>	<b>32</b>
5.6.1. Sistema radicular.....	32

5.6.2. Biomassa das plantas .....	33
5.6.3. Produtividade e componentes de rendimento .....	33
<b>5.7. Análise estatística .....</b>	<b>34</b>
<b>5.8. Segundo estudo.....</b>	<b>345</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>35</b>
<b>6.1. Primeira ação de pesquisa – Eficiência de métodos culturais e práticas mecânicas na descompactação em diferentes estados de compactação em Latossolo.....</b>	<b>37</b>
6.1.1. Caracterização do solo após a aplicação das cargas .....	37
6.1.1.1. Densidade e porosidade do solo.....	37
6.1.1.2. Retenção de água no solo .....	41
6.1.1.3. Resistência à penetração do solo (RP).....	42
6.1.1.4. Condutividade hidráulica do solo saturado.....	423
6.1.2. Análises realizadas durante e após o primeiro ciclo de culturas de outono/inverno.....	45
6.1.2.1. Produtividade de biomassa de milho.....	46
6.1.2.2. Produtividade de biomassa de aveia+nabo.....	47
6.1.2.3. Produtividade de cevada.....	50
6.1.2.4. Resistência à penetração do solo (RP).....	52
6.1.2.5. Condutividade hidráulica do solo saturado <i>in situ</i> .....	56
6.1.3. Análises realizadas durante o primeiro ciclo de soja.....	62
6.1.3.1. Raízes de soja .....	63
6.1.3.2. Rendimento da soja.....	68
6.1.4. Análises realizadas durante e após o segundo ciclo de culturas de outono/inverno.....	70
6.1.4.1. Produtividade de biomassa de milho.....	71
6.1.4.2. Produção de biomassa de aveia+nabo .....	72
6.1.4.3. Produtividade de cevada .....	73
6.1.4.4. Resistência à penetração do solo (RP).....	74
6.1.4.5. Condutividade hidráulica do solo saturado <i>in situ</i> .....	77
6.1.5. Análises realizadas durante e após o segundo ciclo de soja .....	82
6.1.5.1. Rendimento da soja .....	83
6.1.5.2. Densidade e porosidade .....	84
6.1.5.3. Retenção e disponibilidade de água no solo.....	89

6.1.5.4. Condutividade hidráulica saturada em laboratório .....	96
6.1.6. Análises realizadas após o terceiro ciclo de culturas de outono/inverno..	100
6.1.6.1. Produção de biomassa de milho+aveia+nabo .....	100
6.1.6.2. Produtividade de cevada.....	102
6.1.6.3. Resistência à penetração do solo (RP).....	104
6.1.6.4. Condutividade hidráulica saturada <i>in situ</i> .....	107
6.1.7. Análises realizadas durante e após o terceiro ciclo de soja .....	107
6.1.7.1. Produtividade de grãos de soja.....	108
6.1.8. Safras conjuntas e sistemas de culturas.....	110
<b>6.2. Segunda ação de pesquisa – Diagnóstico da compactação para tomada de decisão quanto a necessidade e forma de intervenção na descompactação.....</b>	<b>112</b>
6.2.1. Valores críticos de densidade do solo para a região Centro-sul do Paraná.....	112
6.2.2. Resiliência do solo .....	113
6.2.3. Prevenção da compactação.....	115
6.2.4. Observações no manejo de solos compactados .....	116
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>119</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>121</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Frações granulométricas e teor de matéria orgânica médios da área experimental. ....	17
<b>Tabela 2:</b> Caracterização química média da área experimental.....	18
<b>Tabela 3:</b> Densidade do solo após a aplicação das cargas nas camadas de 0,5 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade.....	38
<b>Tabela 4:</b> Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo após a aplicação das cargas), nas camadas de 0,05 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade. ....	40
<b>Tabela 5:</b> Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) após a aplicação das cargas, nas camadas de 0,05 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade. ....	42
<b>Tabela 6:</b> Teor de água do solo no momento da medida de resistência à penetração (RP), no mês de março de 2018. ....	44
<b>Tabela 7:</b> Teor de água no solo (umidade gravimétrica) no momento da medida de resistência à penetração (RP) no mês de novembro de 2018. ....	56
<b>Tabela 8:</b> Densidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m no mês de novembro de 2018.....	61
<b>Tabela 9:</b> Teor de água no solo na camada de 0,00 - 0,10 m nas diferentes cargas e preparos do solo no momento da realização do ensaio de condutividade hidráulica saturada.....	62
<b>Tabela 10:</b> Peso de mil sementes de soja em função do sistema de culturas e das práticas mecânicas aplicados na safra de 2018/2019.....	68
<b>Tabela 11:</b> Condutividade hidráulica saturada <i>in situ</i> na interação entre sistemas de cultura e níveis de compactação.....	78
<b>Tabela 12:</b> Condutividade hidráulica saturada <i>in situ</i> na interação entre sistemas de preparo e níveis de compactação. ....	79

<b>Tabela 13:</b> Densidade, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade nos tratamentos sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo. ....	85
<b>Tabela 14:</b> Macroporosidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade - interação entre os preparos do solo e as cargas aplicadas. ....	86
<b>Tabela 15:</b> Densidade, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade em todos tratamentos - sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo. ....	87
<b>Tabela 16:</b> Densidade do solo na camada de 0,20 - 0,30 m de profundidade em todos tratamentos - sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo. ....	89
<b>Tabela 17:</b> Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) na interação entre os preparos do solo e as cargas aplicadas na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade. ....	91
<b>Tabela 18:</b> Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) nos sistemas de culturas estudados na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade. ....	92
<b>Tabela 19:</b> Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) na interação entre os preparos do solo e as cargas aplicadas na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade. ....	94
<b>Tabela 20:</b> Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) nos sistemas de cultura estudados na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade. ....	94
<b>Tabela 21:</b> Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) nos sistemas de preparo estudados na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade. ....	96
<b>Tabela 22:</b> Condutividade hidráulica saturada do solo nos diferentes sistemas de cultura e camadas. ....	96
<b>Tabela 23:</b> Condutividade hidráulica saturada do solo nos diferentes níveis de compactação e camadas. ....	97

<b>Tabela 24:</b> Condutividade hidráulica saturada do solo nos diferentes sistemas de preparo e camadas. ....	97
<b>Tabela 25:</b> Permeabilidade ao ar em função dos sistemas de cultura. ....	98
<b>Tabela 26:</b> Permeabilidade ao ar na interação entre as cargas aplicadas e os sistemas de preparo. ....	99
<b>Tabela 27:</b> Condutividade hidráulica saturada <i>in situ</i> ( $K_{sat}$ ), densidade ( $D_s$ ) e umidade gravimétrica (UG) do solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade em todos tratamentos isolados. Sendo os sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo. ....	107
<b>Tabela 28:</b> Densidade crítica para tomada de decisão do manejo da compactação em solos da região Centro-Sul do Paraná. ....	113
<b>Tabela 29:</b> Densidade do solo ( $D_s$ ) inicial, após aplicação das cargas, após os quatro ciclos de umedecimento e secagem e resiliência do solo nos fatores estudados. ....	114
<b>Tabela 30:</b> Densidade do solo relativa ( $D_{sR}$ ) inicial, após a aplicação das cargas e após os quatro ciclos de umedecimento e secagem. ....	115
<b>Tabela 31:</b> Umidade ótima de compactação, na qual deve-se evitar o tráfego de máquinas agrícolas em solos da região Centro-Sul do Paraná. ....	116

## RELAÇÃO DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Croqui de um dos três blocos do experimento.....	20
<b>Figura 2:</b> Compactômetro usado na medida de resistência do solo à deformação. ....	20
<b>Figura 3:</b> Ilustração dos monólitos de solo coletados para avaliação das raízes de soja. ....	32
<b>Figura 4:</b> Parcela com cevada onde, na área escarificada, a parte (a) foi colhida com a colhedora de parcela e nas partes (b), referentes aos locais que o trator trafegou na semeadura, foram colhidas manualmente. ....	34
<b>Figura 5:</b> Distribuição dos pontos de coleta no Estado do Paraná para determinação da densidade máxima do solo.....	36
<b>Figura 6:</b> Curva de Proctor para a camada de 0,00 - 0,20 m do Latossolo do estudo. ....	39
<b>Figura 7:</b> Curvas de retenção de água no solo após a aplicação das cargas nas camadas de 0,05 - 0,10 m (a), 0,10 - 0,15 m (b), 0,15 - 0,20 m (c) e 0,20 - 0,30 (d) m de profundidade.....	41
<b>Figura 8:</b> Resistência à penetração do solo (kPa) nos diferentes níveis de compactação. *A direita Teste de Tukey a 5% de probabilidade entre os níveis de compactação (tratamentos com letras iguais na linha não diferem entre si). Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. ....	43
<b>Figura 9:</b> Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ - $mm\ h^{-1}$ ) para os diferentes níveis de compactação (0, 220 e 440 kPa) nas diferentes camadas estudadas. Barras seguidas da mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, Ns= não significativo. ....	44
<b>Figura 10:</b> Decêndios mensais com as chuvas ocorridas entre os meses de março e novembro de 2018. ....	46
<b>Figura 11:</b> Produção de biomassa do milho em função da carga aplicada na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	46
<b>Figura 12:</b> Produção de biomassa do milho em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	47
<b>Figura 13:</b> Produção de biomassa de aveia+nabo em função da cultura antecessora na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ...	48
<b>Figura 14:</b> Produção de biomassa de aveia+nabo em função da carga aplicada na safra de 2018.....	48
<b>Figura 15:</b> Produtividade de biomassa de aveia+nabo em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ...	49
<b>Figura 16:</b> Produtividade de cevada em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	51

<b>Figura 17:</b> Produtividade de cevada em função dos níveis de compactação aplicados na safra de 2018.....	51
<b>Figura 18:</b> Resistência à penetração do solo (kPa) na interação entre os fatores sistema de culturas e preparo do solo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação entre os sistemas de cultura dentro de cada preparo, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.....	52
<b>Figura 19:</b> Superfície do solo após pousio hibernar. ....	53
<b>Figura 20:</b> Resistência à penetração do solo (kPa) na interação entre os fatores níveis de compactação e preparo do solo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação entre os sistemas de cultura dentro de cada preparo, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.....	54
<b>Figura 21:</b> Resistência à penetração do solo nas áreas plantio direto, escarificado.....	55
<b>Figura 22:</b> Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) avaliada <i>in situ</i> em plantio direto e escarificado. Letras minúsculas fazem a comparação dentro de cada preparo do solo; de forma que letras iguais não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	57
<b>Figura 23:</b> Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) avaliada <i>in situ</i> no tratamento em pousio (a), cevada (b), aveia+nabo (c) e milho-aveia+nabo (d). Letras minúsculas comparam as cargas dentro do mesmo sistema de preparo; letras maiúsculas comparam os sistemas de preparo dentro da mesma carga aplicada; letras iguais não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ....	58
<b>Figura 24:</b> Agregados do solo presentes após a escarificação na área sem compactação ou 0 kPa (esquerda) e na área com maior nível de compactação ou 440 kPa (direita).....	59
<b>Figura 25:</b> Massa dos agregados presentes em área em pousio após escarificação em solo que recebeu cargas de 0, 220 e 440 kPa.....	60
<b>Figura 26:</b> Densidade do solo para os diferentes níveis de compactação (0; 220 e 440 kPa), novembro de 2018. Barras seguidas da mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	60
<b>Figura 27:</b> Densidade do solo para os diferentes sistemas de preparo do solo, novembro de 2018. Barras seguidas de letras diferentes apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	61
<b>Figura 28:</b> Decêndios mensais das chuvas entre os meses de novembro de 2018 e abril de 2019. ....	63
<b>Figura 29:</b> Diâmetro médio das raízes de soja submetidas a diferentes sistemas de preparo, culturas antecessoras e níveis de compactação (a: 0 kPa e b: 440 kPa). As letras nas barras de médias fazem a comparação entre os sistemas de	

cultura dentro de cada prática mecânica, letras iguais significam que não há diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ....	63
<b>Figura 30:</b> Densidade de raízes de soja no perfil de solo nos tratamentos estudados. Legenda: Cevada e Rotação (milheto/aveia+nabo) foram as culturas antecedentes; 0 e 440 são os níveis de compactação baixo e alto e DD, ES e HS são, respectivamente, as práticas mecânicas, disco duplo, escarificação e haste sulcadora. ....	64
<b>Figura 31:</b> Comprimento de raízes de soja em diferentes profundidades e sistema de preparo utilizado. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ...	65
<b>Figura 32:</b> Área superficial de raízes de soja em diferentes profundidades e sistema de preparo utilizado. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ...	66
<b>Figura 33:</b> Distribuição da massa seca de raízes de soja no perfil de solo nos tratamentos estudados. Legenda: Cevada e Rotação (milheto + nabo) foram as culturas antecedentes; 0 e 440 são os níveis de compactação baixo e alto e DD, ES e HS são as práticas mecânicas, disco duplo, escarificação e haste sulcadora respectivamente.....	67
<b>Figura 34:</b> Produtividade de soja em função dos tratamentos de práticas mecânicas, safra 2018/2019. *Médias seguidas de letras diferentes apresentaram diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.	69
<b>Figura 35:</b> Produtividade de soja em função da carga aplicada na safra de 2018/2019.....	69
<b>Figura 36:</b> Decêndios mensais das chuvas entre os meses de abril de 2019 e novembro de 2019. ....	70
<b>Figura 37:</b> Produção de biomassa milheto em função do sistema de manejo aplicado e das cargas aplicadas na safra de 2019. ....	71
<b>Figura 38:</b> Produtividade de biomassa de aveia+nabo em função do sistema de manejo e das cargas aplicadas na safra de 2019. (a): pousio como cultura antecessora, (b) milheto como cultura antecessora.....	72
<b>Figura 39:</b> Produtividade de cevada em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2019. ....	73
<b>Figura 40:</b> Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de cultura. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas de cultura, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. ....	74
<b>Figura 41:</b> Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes níveis de compactação. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os níveis de compactação estudados, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. ....	75
<b>Figura 42:</b> Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes preparos do solo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a	

comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas preparo estudados, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. ....	76
<b>Figura 43:</b> Teor de água no solo nos diferentes sistemas de cultura no momento da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ....	79
<b>Figura 44:</b> Umidade do solo nas diferentes práticas mecânicas no momento da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ....	80
<b>Figura 45:</b> Densidade do solo nos diferentes níveis de compactação no momento da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ....	81
<b>Figura 46:</b> Densidade do solo nos diferentes sistemas de preparo do solo da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ....	82
<b>Figura 47:</b> Decêndios mensais das chuvas entre os meses de novembro de 2019 e abril de 2020. *A estação meteorológica estava inoperante entre 07 e 17 de janeiro de 2020, portanto foram utilizados os dados da estação de Foz do Jordão (cerca de 10 km do experimento). ....	83
<b>Figura 48:</b> Produtividade de soja em função dos sistemas de cultura utilizados. ....	83
<b>Figura 49:</b> Produtividade de soja em função dos níveis de compactação aplicados. ....	84
<b>Figura 50:</b> Produtividade de soja em função dos sistemas de preparo utilizados. ....	84
<b>Figura 51:</b> Curvas de retenção de água no solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade, nas interações preparos o solo x cargas aplicadas (a,b e c) e nos sistemas de cultura estudados (d). Legenda: DD (disco duplo), HS (haste sulcadora), ES (escarificação). ....	90
<b>Figura 52:</b> Curvas de retenção de água no solo na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade. Nas interações preparos o solo x cargas aplicadas (a,b e c) e nos sistemas de cultura estudados (d). Legenda: DD (disco duplo), HS (haste sulcadora), ES (escarificação). ....	93
<b>Figura 53:</b> Curva de retenção de água no solo na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade nos diferentes preparos de solo. ....	95
<b>Figura 54:</b> Decêndios mensais das chuvas entre os meses de abril de 2020 e novembro de 2020. ....	100
<b>Figura 55:</b> Produtividade de biomassa de aveia+nabo e de milho+aveia+nabo. ....	101

<b>Figura 56:</b> Produtividade de milho+aveia+nabo em função do nível de compactação.....	101
<b>Figura 57:</b> Produtividade de biomassa de milho+aveia+nabo em função dos sistemas de preparo. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	102
<b>Figura 58:</b> Produtividade de grãos de cevada em função dos níveis de compactação. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.....	103
<b>Figura 59:</b> Produtividade de grãos de cevada em função dos sistemas de preparo. ....	103
<b>Figura 60:</b> Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de cultura. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas de cultura, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. ....	104
<b>Figura 61:</b> Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de cultura. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico, ns= não significativo pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	105
<b>Figura 62:</b> Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de preparo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas de cultura, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. Legenda: DD: disco duplo, HS: haste sulcadora, ESC: escarificado. ....	106
<b>Figura 63:</b> Decêndios mensais das chuvas entre os meses de novembro de 2020 e março de 2021. ....	108
<b>Figura 64:</b> Produtividade de soja em função do sistema de cultura utilizado. ....	109
<b>Figura 65:</b> Produtividade de soja em função do nível de compactação. ....	109
<b>Figura 66:</b> Produtividade de soja em função do sistema de preparo do solo. ....	110
<b>Figura 67:</b> Soma da produtividade de soja nas 3 safras (2018,2019 e 2020) nos diferentes sistemas de cultura estudados. ....	111
<b>Figura 68:</b> Irregularidade na superfície do solo causada pela passagem de pulverizador autopropelido em área escarificada.....	118

## 1. INTRODUÇÃO

A cada ano nota-se uma expansão do sistema plantio direto, estando o mesmo atualmente presente em cerca de 51% das áreas agrícolas cultivadas no Brasil (IBGE, 2017). No entanto, juntamente com essa expansão, ocorre aumento da preocupação com a redução de produtividade, bem como problemas ambientais causados pela compactação do solo (Schjønning et al., 2015), que, por muitas vezes, está atrelada ao plantio direto. Com relação à compactação, um dos maiores desafios está relacionado ao diagnóstico da mesma, onde diversos autores têm buscado valores críticos de atributos do solo para detectá-la ou até mesmo para relacionar esses valores com o desenvolvimento das plantas (LETEY 1985; REICHERT et al., 2003; BEUTLER et al., 2005; MORAES et al., 2014; PEIXOTO et al., 2019).

A região de abrangência da Cooperativa Agrária, no Centro-Sul do Paraná, tem praticamente a totalidade da sua área cultivada pelo sistema plantio direto. A Cooperativa abrange uma área cultivada, em rotação, de aproximadamente 85 mil ha de soja e 30 mil ha de milho no verão, 50 mil ha de cereais de inverno (trigo e cevada) e o restante com plantas de cobertura (aveia preta, nabo forrageiro, aveia branca e ervilhaca).

O manejo da fertilidade do solo em plantio direto vem sendo pesquisado em nível regional numa cooperação técnica entre a FAPA (Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária) e a UFRGS (Departamento de Solos) há mais de 15 anos. O manejo da calagem, da adubação fosfatada e potássica, uso do gesso agrícola e da adubação sulfatada tem sido foco dessas pesquisas. Atualmente há um sistema bem definido de manejo da fertilidade dos solos em plantio direto visando a máxima eficiência dos nutrientes e retorno econômico do investimento (FONTOURA et al., 2015).

Nesses 15 anos de pesquisa cooperativa entre a UFRGS e a FAPA, a compactação do solo tem sido levantada por técnicos e cooperados como um tema de grande relevância no manejo de solo na região, acreditando tratar-se de um dos principais fatores limitantes à maior produtividade das culturas. Atualmente, existem algumas iniciativas relacionadas à agricultura de precisão, onde é realizado o mapeamento da resistência à penetração das áreas. Mas não há nenhum estudo conduzido referente aos níveis críticos de parâmetros de solo quanto ao seu impacto na produtividade das culturas. Apesar das elevadas produtividades obtidas em nível de lavoura – aproximadamente 12 t/ha de milho, 4,2 t ha<sup>-1</sup> de soja e 3-4 t ha<sup>-1</sup> de cereais de inverno – estas oscilam entre 60-75% do potencial de produtividade alcançado em nível experimental na região pela FAPA, acreditando-se que, ao menos em parte, esta lacuna de produtividade esteja relacionada à restrição física ao crescimento radicular devido ao nível de compactação do solo.

Em nível nacional, a compactação do solo tem sido um tema de alta reincidência dentre as preocupações da comunidade científica, dos técnicos e dos produtores rurais em relação ao sistema plantio direto (DENARDIN et al., 2008). Tem sido preconizado como um dos principais fatores relacionados à oscilação da produtividade das culturas, especialmente em anos com déficit hídrico. Nestes anos, as raízes não conseguem explorar grandes volumes de solo em profundidade, o que diminui a capacidade de absorção de água e nutrientes (TORRES; SARAIVA, 1999; SINGH; HADDA, 2014). Quanto à mitigação do impacto da compactação na produtividade das culturas, uma das principais indagações é quanto à eficiência de métodos culturais (rotação de culturas comerciais e plantas de cobertura com sistema radicular abundante e de rápido crescimento) e mecânicos (escarificação e elementos sulcadores tipo facão, haste sulcadora e discos na semeadora) em diferentes graus de compactação do solo. Ou seja, até que grau de compactação a intervenção pode ser por práticas culturais, e a partir de que grau deve-se realizar uma intervenção mecânica, visando minimizar a restrição ao crescimento radicular e potencial produtivo das culturas.

Na região do estudo, o sistema que predomina é a sucessão cevada-soja, com pousio outonal, esse pousio dura em torno de 2 meses. E apesar da

predominância do plantio direto, alguns produtores vem adotando a escarificação no inverno. Porém, na maioria das vezes a escarificação é realizada sem um diagnóstico do nível de compactação do solo, o que pode acarretar em gastos desnecessários de combustível e equipamentos, além de que, em alguns casos, ela tem potencial efêmero de mitigar a compactação (DRESCHER et al., 2011). Portanto, é possível que em determinadas condições a compactação poderia ter sido mitigada com o simples uso de plantas de cobertura (a médio/longo prazo) ou com uma prática mecânica mais simples, como o uso da haste sulcadora. O emprego de haste sulcadora nas semeadoras-adubadoras de precisão, por ocasião da semeadura, tem mostrado potencial para descompactação do solo e aumento da produtividade em outras localidades, como constatado por Nunes et al. (2015).

Além de diferentes culturas de inverno como cevada, trigo, nabo e aveia, a intensificação do uso do solo com plantas de cobertura pode ser realizada utilizando uma cultura de verão após a colheita da soja, de forma a suprimir o pousio outonal. Uma opção para tal técnica é o uso do milheto, que no Cerrado já tem sido estudado como uma alternativa de produção de matéria seca, e tem apresentado resultados positivos do ponto de vista de qualidade do solo (MACHADO; ASSIS, 2010).

Com base nisso, este estudo buscou criar um diagnóstico do estado de compactação em solos da região de abrangência da Cooperativa Agrária, bem como sugerir práticas de mitigação específicas para cada condição diagnosticada. Diante disso, a pesquisa foi dividida em duas ações. A primeira ação foi relacionada à avaliação, em nível experimental, da eficiência de métodos culturais (pousio-soja, cevada-soja, aveia+nabo-soja e aveia+nabo-soja-milheto) e práticas mecânicas (disco duplo na semeadora, haste sulcadora na semeadora e escarificação), na descompactação do solo com indução de diferentes pressões provocadas por rodados em toda a sua superfície (sem compactação, compactado com pressão de 220 e de 440 kPa).

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Bruno, com textura muito argilosa, conduzido há mais de 15 anos em plantio direto. Nessa ação de pesquisa experimental se visou a definição de níveis críticos de

parâmetros físicos do solo a fim de servir no diagnóstico da necessidade de intervenção, bem como avaliar a eficiência da intervenção cultural e mecânica em solo com diferentes níveis de compactação sobre a produtividade de soja.

Com as informações técnicas geradas na pesquisa experimental, se deu início a segunda ação do projeto, a qual consiste num diagnóstico regional do estado de compactação do solo na área de abrangência da Cooperativa Agrária e a recomendação do tipo de intervenção a ser realizada pelos produtores.

Inicialmente, visando ampliar a representatividade dos níveis críticos gerados para aplicação em nível regional, foram coletadas amostras de solo em lavouras de 20 produtores cooperados da Cooperativa Agrária. Os solos coletados abrangeram uma ampla faixa de textura e de teor de matéria orgânica. Nessas amostras foi determinada a densidade máxima que o solo pode atingir, bem como a granulometria e o teor de matéria orgânica para serem relacionados à sua densidade máxima. Com esses valores elaborou-se uma tabela, informando a densidade crítica do solo a partir da qual deve-se adotar alguma prática de mitigação da compactação em diferentes solos da região. Esse valor crítico se embasou em alguns dados obtidos em nível experimental (ação de pesquisa 1), interpretados de forma associada com resultados disponíveis na literatura de densidade relativa ótima para solos similares aos da região em estudo. Optou-se pela densidade como o parâmetro de diagnóstico pois, além de ser facilmente determinada, não sofre influência da umidade do solo, como é o caso da resistência do solo à penetração, por exemplo, e principalmente também por apresentar baixo coeficiente de variação (<10%), segundo citado por Warrick e Nielsen (1980).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Compactação do solo**

A compactação foi definida por Holtz e Kovacs (1981) como sendo o adensamento dos solos pela aplicação de energia mecânica. Esse adensamento diminui a quantidade de macroporos do solo e a infiltração de água e aumenta a resistência mecânica e, conseqüentemente, a densidade do solo (DEJONG-HUGHES et al., 2001). Contudo, Curi et al. (1993) definem compactação como a diminuição do volume do solo causada por compressão, rearranjando as partículas do solo de uma forma mais densa, reduzindo a porosidade sendo, assim, resultado de ação antrópica. Esses autores definem o adensamento como a redução natural da porosidade e conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes por dessecação, iluviação ou precipitação química, sendo este um fenômeno natural.

A compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas e implementos pesados ou mesmo pelo manejo inadequado do solo ameaça a funcionalidade do solo e deve, portanto, ser evitada (REICHERT et al., 2014).

A compactação pode ser detectada através de diversas modificações em propriedades físicas do solo, dentre as quais pode-se citar o aumento na densidade do solo e da resistência do solo à penetração das raízes, redução da macroporosidade, redução da condutividade hidráulica e empoçamento de água na superfície do solo (RICHART et al., 2005).

A ocorrência de camadas compactadas faz com que as plantas acumulem raízes no volume de solo acima dessa camada, o que restringe o

volume de solo ocupado pelas mesmas, podendo reduzir a produtividade das culturas (BEULTER; CENTURION, 2004) por diminuir a absorção de água e de nutrientes (MEDEIROS; SOARES; GUIMARAES, 2005). Isso ocorre porque a compactação altera toda estrutura do solo, destrói os macroagregados formados biologicamente e forma agregados grandes, mais densos e fracos, com poucos poros interagregados e de menor diâmetro (HORN et al., 1995).

## **2.2. Causas da compactação do solo**

As causas de degradação da estrutura física e da compactação do solo ainda não foram integralmente investigadas. Isso porque existem diversos fatores que estão envolvidos, dentre eles, diferentes sistemas de manejo e de culturas, umidade do solo durante as operações de campo e pressões exercidas pelo intenso tráfego de máquinas. Devido a muitas vezes ter um curto espaço de tempo para semear, realizar os tratamentos culturais na lavoura, bem como a necessidade de pastejo de animais, muitas destas atividades são realizadas em condições de umidade do solo fora da ideal ou recomendada, que é no estado de consistência friável (HAKANSSON; VOORHEES; RILEY, 1988).

A pressão exercida pelos pneus de máquinas e implementos agrícolas é uma das causas mais relevantes da compactação (MARSILI et al., 1998). Essa pressão varia conforme a largura e diâmetro dos pneus, pressão de inflação dos mesmos e pela distribuição de peso por eixo (HAKANSSON, 1990). O conteúdo de água do solo também interfere na compactação. Silva e Cabeda (2006) verificaram que à medida que aumentava o teor de água do solo, diminuía os valores da pressão de pré-consolidação e aumentava o índice de compressão do solo, indicando menor capacidade de suporte de carga e maior compressibilidade do solo, respectivamente. Segundo Massad (2010), a água tem um efeito lubrificante entre as partículas de solo, facilitando a aproximação das partículas com a aplicação de cargas. Portanto, o tráfego de máquinas em solos agrícolas deve ocorrer quando o conteúdo de água dele está baixo (faixa da friabilidade ou menos), com o propósito de evitar a compactação do solo.

Dentre as principais características do solo que interferem na sua compactação, podem ser citadas a distribuição do tamanho de partículas, sendo

que quanto maior o teor de argila, maior a profundidade a qual a pressão é transmitida e maior a espessura da camada compactada (HORN, 1988). Entretanto, além do teor de argila, os óxidos que essa fração argila apresenta, também apresentam papel importante na compactação do solo. Isso foi demonstrado por Ferreira et al. (1999a), e Ferreira et al. (1999b), onde os Latossolos caulíníticos apresentam maior densidade do solo, menor estabilidade de agregados em água, menor macroporosidade e menor permeabilidade em relação aos Latossolos gibbsíticos. Isso acontece porque a estabilidade dos agregados se correlaciona positivamente com os teores de gibbsita e, negativamente, com os teores de caulinita.

Outra característica do solo que tem influência sobre a compactação é a matéria orgânica. A mesma torna o solo mais resistente à compactação, bem como aumenta o conteúdo de água crítico para que esta ocorra (BRAIDA et al., 2006). Além da matéria orgânica, esses autores verificaram que a presença de palha sobre o solo é capaz de dissipar parte da energia de compactação, reduzindo a densidade máxima obtida, variando com a quantidade de palha, da energia aplicada e das condições do solo. Portanto, sistemas de manejo que permitem o acúmulo de maior quantidade de biomassa sobre o solo, bem como de matéria orgânica no perfil, são menos suscetíveis à compactação.

## **2.3. Diagnóstico do estado de compactação do solo**

### **2.3.1. Densidade e porosidade**

A densidade do solo é representada pela massa de solo seco por unidade de volume, sendo o seu valor inversamente proporcional à porosidade (TORMENA et al., 2002). Portanto, é possível inferir que a compactação se relaciona diretamente também com a capacidade do solo em transportar água ou ar. Por se relacionar diretamente com os outros atributos físicos do solo e ser de fácil obtenção, a densidade do solo é o parâmetro usado com maior frequência para caracterizar precisamente o estado de compactação do solo (PANAYIOTOPOULOS; PAPADOPOULOU; HATJIIOANNIDOU, 1994; STRECK et al., 2004; LIMA et al., 2017; PÖHLITZ et al., 2018).

A densidade do solo em ambientes sem interferência antrópica e sem cultivo é dependente apenas de fatores e processos pedogenéticos e do teor de matéria orgânica do solo. O uso do solo pode aumentar sua densidade, devido à perda de matéria orgânica do solo, ao pisoteio animal, tráfego de máquinas e implementos agrícolas, cultivos e sistemas de manejo (HAMZA; ANDERSON, 2005).

A compactação do solo, além de aumentar a densidade, causa várias alterações na estrutura do solo, dentre elas no tamanho, na distribuição, na continuidade, no volume e na geometria dos poros (LIMA et al., 2005).

### 2.3.2. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RP) é um indicador físico que tem sido utilizado para representar a resistência do solo ao crescimento das raízes (KELLER et al., 2015; LIMA et al., 2016); bem como para identificar camadas compactadas no perfil do solo (JEŘÁBEK; ZUMR; DOSTÁL, 2017).

A RP é obtida fácil e rapidamente no campo com o uso de penetrômetros digitais. E também em laboratório, a RP pode ser medida em amostras de solo com um penetrômetro de bancada. Quando medida a campo, deve-se coletar amostras de solo para determinação da umidade. Quando medida em laboratório, as amostras devem ser saturadas por capilaridade e depois drenadas até todas atingirem o mesmo potencial de água. Os procedimentos citados são importantes, pois a quantidade de água interfere significativamente na RP (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000).

Além de ser facilmente obtida, a RP pode ser correlacionada mais fortemente com a compactação do solo, em comparação com outros parâmetros, como densidade e porosidade (STRECK et al., 2004). Apesar disso, nem sempre a RP se correlaciona com a produtividade das culturas (CARVALHO et al., 2006; FREDDI et al., 2006), necessitando-se, portanto, mais análises quando se deseja detectar de forma minuciosa a interferência da compactação do solo. A principal desvantagem deste método, é que os valores obtidos são diretamente

afetados pela umidade do solo, devendo ter o cuidado, portanto, de realizar essas medidas quando o solo apresenta conteúdo de água próximo a capacidade de campo, ou então fazer uma correção dos valores obtidos (MORAES et al., 2012).

### 2.3.3. Fluxo de água no solo

O fluxo de água no solo pode ser avaliado de diversas maneiras, sendo as duas principais a condutividade hidráulica do solo saturado e a infiltração de água.

A condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_0$ ) é uma propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta através do perfil do solo. A primeira equação para quantificar o movimento de água no solo foi introduzida por Darcy (1856), o qual trabalhou com colunas de areia saturadas de água. Esta equação estabelece que a quantidade de água que passa em um meio poroso por unidade de área e tempo é proporcional ao gradiente hidráulico.

A  $K_0$  descreve a funcionalidade de seu sistema poroso, sendo afetada pelo tamanho, forma, continuidade e orientação dos poros, sendo, portanto, um atributo com bastante variabilidade. Desta forma, a  $K_0$  é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. A macroporosidade ( $Ma$ ) afeta fortemente a  $K_0$ . Silva e Kato (1997), estudando um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo verificaram correlação positiva entre  $Ma$  e  $K_0$ .

A infiltração é um processo onde a água se move de forma descendente no perfil do solo. Inicialmente, quando o solo está seco, seu valor é alto, diminuindo com o passar do tempo até que o solo sature e atinja assim um valor constante de infiltração (ALMEIDA et al., 2018). Assim sendo, o momento em que a infiltração se torna constante é conhecido por taxa de infiltração básica (TIB).

Os principais fatores que influenciam a infiltração de água no solo são a porosidade, umidade, atividade biológica, cobertura vegetal, rugosidade

superficial e declividade do terreno (CAUDURO; DORFMAN, 1988). O selamento superficial é outro fator que reduz consideravelmente a infiltração de água no solo (REICHERT; VEIGA; CABEDA, 1992). O selamento da superfície é causado pelo impacto da gota de chuva em solo sem cobertura, pela dispersão físico-química das argilas do solo (MORIN; VAN WINKEL, 1996; BULLARD et al., 2018) e influenciado pelo sistema de manejo adotado, sendo maior em áreas com revolvimento do solo (SILVA; KATO, 1997).

Dalla Rosa (1981) concluiu que a taxa de infiltração de água no solo é a propriedade que melhor reflete o grau de degradação do sistema poroso do solo, pois mesmo apresentando maior quantidade de poros, sistemas com subsolagem apresentam menor infiltração de água.

#### 2.3.4. Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar ( $K_a$ ) representa a capacidade do solo em conduzir gases, respondendo a um gradiente de pressão, por um processo denominado fluxo de massa ou fluxo convectivo (LAL, 2000).

A  $K_a$  é fortemente relacionada com a porosidade preenchida por ar, macroporosidade, estrutura (TANG et al., 2011), densidade (SILVA et al., 2009) e textura do solo (HOLTHUSEN et al., 2018). Esse parâmetro tem comportamento semelhante à condutividade hidráulica, dependendo do conteúdo volumétrico de água e da quantidade, forma, tamanho e continuidade de poros (ROSEBERG; MCCOY, 1990). Por se relacionar com diversos parâmetros físicos, a permeabilidade ao ar pode refletir o estado de compactação do solo (MUNKHOLM; SCHJØNNING; KAY, 2002).

Uma vantagem importante da  $K_a$  é que a mesma é bastante sensível as mudanças na estrutura do solo (FISH; KOPPI, 1994). Portanto, essa análise poderá detectar alterações na estrutura e compactação do solo causadas pelo tráfego de máquinas (VOGELER et al., 2006).

## **2.4. Mitigação da compactação do solo**

### **2.4.1. Mitigação da compactação por práticas mecânicas**

As áreas trabalhadas por longo período em plantio direto em condições inadequadas de umidade do solo, podem apresentar uma camada compactada, normalmente se situando entre as profundidades de 0,08 m e 0,20 m (STRECK et al., 2004; ABREU; REICHERT; REINERT, 2004; NUNES et al., 2015). Portanto, de modo geral, as práticas mecânicas devem ser capazes de agir em profundidades abaixo da camada compactada. Atualmente as práticas mecânicas mais utilizadas são realizadas usando-se hastes ou facões acoplados nas linhas das semeadoras, escarificadores e, em alguns casos, arados.

O uso de mecanismos rompedores nas semeadoras causa menor mobilização do solo, se restringindo à linha de semeadura e tem a vantagem de não exigir uma operação extra (ocorre no momento da semeadura). Porém, é importante saber que, ao se usar hastes, o esforço de tração será maior quanto maior for a sua profundidade de atuação (CONTE et al., 2009). Levien et al. (2011), verificaram que a utilização do sulcador tipo haste provocou uma mobilização 52% maior do solo na linha de semeadura, comparada à de discos duplos, exigindo 32% a mais na força média de tração.

O uso de hastes pode diminuir a densidade do solo (NUNES et al., 2014), melhorar o estabelecimento e estande de plantas (LEVIEN et al., 2011) e permitir o maior crescimento e aprofundamento de raízes (NUNES et al., 2015). Apesar dos benefícios no solo obtidos após o uso de haste sulcadora, poucos são os ganhos em produtividade. É provável que diferenças de produtividade ocorram em anos de déficit hídrico, onde plantas com maior volume de raízes explorariam mais solo e absorveriam mais água. Outra hipótese é que os efeitos positivos dessa prática apareçam mais expressivamente a longo prazo.

Outras práticas mecânicas que já foram muito utilizadas no passado para o preparo do solo, hoje estão retornando para mitigar os efeitos da compactação, é o caso da aração e a escarificação. A escarificação é menos

intensa em termos de mobilização do solo em relação à aração, pois ela deixa o solo menos exposto a erosão e à decomposição da matéria orgânica. Segundo Seki et al. (2015), quanto maior a profundidade de atuação das hastes, maior a exposição do solo.

A escarificação é capaz de romper camadas compactadas, elevar o volume do solo, aumentar a porosidade e reduzir a densidade do solo (NUNES et al., 2015). Porém esta prática tem sido efêmera para mitigar a compactação em alguns estudos, pois os efeitos da mesma duram por poucos ciclos de cultivo, voltando a uma situação estrutural igual ou pior à condição anterior (DRESCHER et al., 2011). Além disso, mesmo reduzindo a densidade do solo por determinado tempo, muitas vezes a escarificação não é capaz de aumentar a produtividade das culturas (KLEIN; CAMARA, 2007; SEKI et al., 2015).

#### 2.4.2. Mitigação da compactação por práticas vegetativas

As práticas vegetativas não causam mobilização do solo, desta forma não o expõem aos agentes erosivos. Porém, as alterações no solo ocorrem de forma mais lenta do que em relação a uma prática mecânica, pois uma raiz penetra no solo de forma mais lenta do que a haste de implementos agrícolas.

Visto que práticas mecânicas muitas vezes não têm efeito duradouro em melhoria das propriedades físicas do solo, o uso de plantas de cobertura é uma prática eficiente neste sentido. O fato de não deixar o solo em pousio é um ponto chave nesse processo, e pode ser ainda melhor ao usar plantas de cobertura, com alta produção de biomassa e sistema radicular abundante. Essas plantas, por meio do seu sistema radicular, são capazes de romper camadas compactadas e produzir bioporos, que servirão para o desenvolvimento das raízes da cultura posterior (SILVA; ROSOLEM, 2002), bem como para a infiltração de água no solo (OADES, 1993). A principal vantagem que os bioporos apresentam é que são longos e contínuos, facilitando o transporte de água e ar, diferentemente dos formados por práticas mecânicas. Além da formação de bioporos, as raízes das plantas têm grande importância no desenvolvimento da estrutura do solo pela estabilização de agregados do solo (OADES, 1993).

Além das vantagens já citadas, o uso de plantas para mitigar a compactação proporciona cobertura ao solo, que é capaz de reduzir as perdas de água e solo por erosão hídrica em relação ao solo sem cobertura (PANACHUKI et al., 2011), além de diminuir a perda de água por evaporação (ANDRADE, 2008).

O conjunto de melhorias do solo causadas pelo uso de plantas de cobertura acaba por refletir, de forma positiva, no desenvolvimento e produtividade de culturas como milho e soja (DEBIASI et al., 2010). Esse efeito poderia ser potencializado ao se usar outra planta de cobertura na entressafra de outono (entre a cultura de verão e a de inverno), para aportar grande quantidade de biomassa durante o ano agrícola sem precisar deixar de cultivar a cultura de maior importância econômica no verão.

Outro efeito importante do uso de culturas, é que a presença de palha sobre o solo é capaz de dissipar parte da energia de compactação, reduzindo a compactação do solo. O aumento no teor de matéria orgânica do solo, também o torna mais resistente a deformações causadas pela aplicação de cargas (BRAIDA et al., 2006).

### **3. HIPÓTESES**

**a-** As práticas mecânicas são mais eficientes na descompactação no maior estado de compactação, não ocorrendo, desta forma, redução da produtividade das culturas.

**b-** Práticas vegetativas são eficientes na descompactação em estados intermediários da compactação.

**c-** Sistemas de culturas que incluem maior número de espécies vegetais, permitem melhorias na estrutura do solo, bem como maior produtividade das culturas.

**d-** Os teores de argila e matéria orgânica do solo tem boa relação com a densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de Proctor.

## **4. OBJETIVO GERAL**

Avaliar a eficiência de métodos culturais e práticas mecânicas na mitigação de diferentes níveis de compactação em Latossolos sob plantio direto na região Centro-Sul do Paraná, além de determinar valores críticos de densidade para auxiliar a tomada de decisão quanto a necessidade de mitigação da compactação nos solos da região.

### **4.1. Objetivos específicos**

Avaliar o efeito das práticas mecânicas de escarificação e utilização de sulcador disco duplo ou facão da semeadora na mitigação da compactação e na produtividade das culturas.

Avaliar o efeito de sucessão e rotação de culturas na mitigação da compactação e na produtividade das culturas.

Determinar valores críticos de parâmetros físicos do solo em Latossolos da região e utilizar em diagnósticos visando a tomada de decisão quanto à necessidade de intervenção e forma de descompactação do solo pelos produtores rurais no Centro-Sul do Paraná.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

O trabalho foi conduzido na região de abrangência da Cooperativa Agrária Agroindustrial Ltda na região Centro-Sul do Paraná, no âmbito de uma cooperação em pesquisa, a qual vem sendo desenvolvida há mais de 15 anos entre o Departamento de Solos da UFRGS e a Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA).

O projeto foi dividido em duas ações de pesquisa. A primeira ação é relacionada à avaliação, em nível experimental, da eficiência de métodos culturais e práticas mecânicas na mitigação de diferentes níveis de compactação de um Latossolo sob plantio direto. Através da definição de níveis críticos de densidade, será possível diagnosticar a necessidade de intervenção e a forma de descompactação nas áreas da região.

### **5.1. Localização e caracterização do experimento**

O estudo foi conduzido em experimento instalado em março de 2018, na Agropecuária Santa Clara localizada no município de Cândói, (25°34'10" latitude Sul, 51°59'51" longitude Oeste e altitude de 925 m), região Centro-Sul do estado do Paraná.

Segundo a classificação de Koeppen, o clima é do tipo temperado Cfb, caracterizado por verões amenos, temperatura mínima anual de 13,5 °C (média diária) e temperatura máxima anual de 24,5 °C (média diária) com geadas severas e sem estação seca definida, sendo a precipitação pluvial anual média entre 1.800 e 2.000 mm (NITSCHE et al., 2019).

O solo foi classificado como um Latossolo Bruno (EMBRAPA, 2013), com relevo suave a levemente ondulado (MAAK, 2002), cuja granulometria e o

teor de matéria orgânica estão apresentados na Tabela 1 e a caracterização química na Tabela 2.

**Tabela 1:** Frações granulométricas e teor de matéria orgânica médios da área experimental.

Camada (m)	Matéria orgânica	Areia*	Silte*	Argila*	Classe textural
0,00 - 0,05	61	110	453	437	Argilo-siltosa
0,05 - 0,10	58	77	447	477	Argilo-siltosa
0,10 - 0,15	52	57	380	563	Argilosa
0,15 - 0,20	49	47	357	597	Argilosa
0,20 - 0,30	50	53	350	597	Argilosa
0,30 - 0,40	37	47	323	630	Muito Argilosa

\*Areia: partículas maiores que 0,05 mm. Silte: partículas entre 0,002 mm e 0,05 mm. Argila: partículas menores que 0,002 mm.

**Tabela 2:** Caracterização química média da área experimental.

Camada (m)	pH H <sub>2</sub> O	SMP -	P ---(mg dm <sup>-3</sup> )---	K	CTC (cmolc dm <sup>-3</sup> )	% SAT da CTC Bases Al	
0,00 - 0,05	6,2	6,3	8,3	176,7	15,9	80,7	0,0
0,05 - 0,10	6,1	6,2	5,5	115,3	15,2	76,3	0,0
0,10 - 0,15	5,8	6,1	2,2	92,7	13,4	72,0	0,0
0,15 - 0,20	5,4	5,9	1,1	64,0	11,6	56,0	3,3
0,20 - 0,30	5,6	6,0	2,1	88,3	12,5	64,7	0,0
0,30 - 0,40	5,3	6,0	0,8	20,7	8,2	43,3	13,0

## 5.2. Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos

A área onde o experimento foi implantado não tem histórico de compactação e o plantio direto já vinha sendo utilizado há mais de 15 anos, tendo a soja como a cultura principal na rotação de culturas. O experimento consiste num arranjo fatorial 4x3x3 (sistemas de culturas x níveis de compactação x práticas mecânicas), seguindo o delineamento experimental de blocos ao acaso, com três blocos em parcelas subdivididas.

Os sistemas de cultura foram dispostos na parcela principal, os níveis de compactação na subparcela e as práticas mecânicas na subsubparcela. As parcelas com o sistema de cultura têm 75 m x 21 m e foram divididas em 5 partes de 15 m x 21 m (3 subparcelas e 2 corredores para manobra). Nestas três subparcelas foram dispostos os três estados de compactação; e por fim as subparcelas foram divididas em três faixas de 15 m x 7 m, as quais constituem as subsubparcelas onde foram aplicadas as práticas mecânicas.

O primeiro fator consiste em quatro sistemas de culturas, e visa avaliar o potencial de diferentes sistemas de culturas de cobertura do solo com distintos aportes de biomassa e sistemas radiculares, com intuito de minimizar o impacto

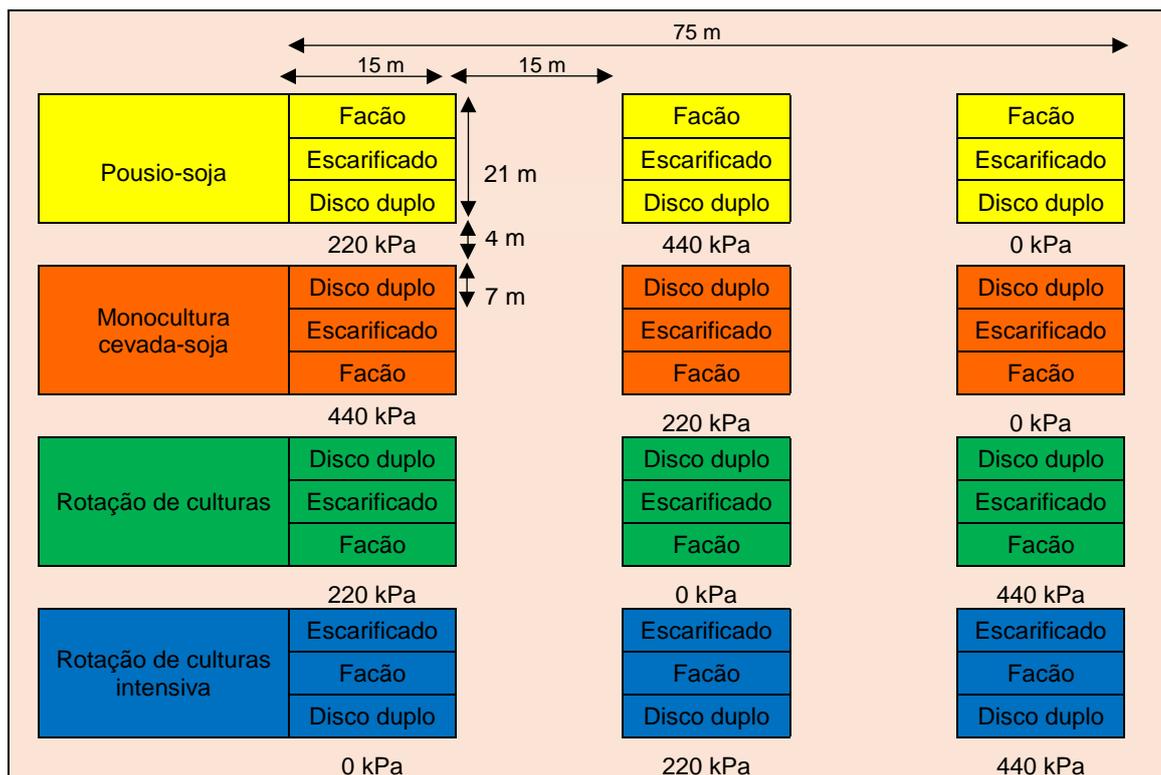
da compactação e favorecer/melhorar/aumentar a produtividade das culturas comerciais. Os sistemas de rotação/sucessão de culturas avaliados foram: (a) pousio-soja; (b) monocultura cevada-soja; (c) rotação de culturas (aveia+nabo-soja) e (d) rotação de culturas intensiva (milheto-aveia+nabo-soja). Soja= *Glycine max*, cevada= *Hordeum vulgare*, aveia= *Avena sativa*, nabo= *Raphanus sativus* e milheto= *Pennisetum glaucum*.

Apesar de ser realizada uma dessecação após a colheita da cultura da soja, na área em pousio algumas plantas acabam aparecendo em partes da parcela, principalmente azevém (*Lolium multiflorum*), trapoeraba (*Commelina benghalensis*) e buva (*Conyza bonariensis*).

O segundo fator consiste dos estados de compactação, onde três cargas foram aplicadas sobre a superfície do solo visando estabelecer esses tratamentos: (a) carga zero (nível de compactação atual); (b) carga de 220 kPa (estado de compactação médio) e (c) carga de 440 kPa (estado de compactação elevado).

O terceiro fator envolve práticas mecânicas para a descompactação, que foram: (a) sem prática mecânica (disco duplo de corte na semeadora); (b) utilização de haste sulcadora na semeadora da cultura de verão e (c) escarificação.

A distribuição dos tratamentos a campo é apresentada na Figura 1.



**Figura 1:** Croqui de um dos três blocos do experimento.

Para determinar quais as cargas seriam utilizadas para gerar os diferentes estados de compactação foi usado um compactômetro, o qual foi desenvolvido especificamente para essa ação de pesquisa (Figura 2).



**Figura 2:** Compactômetro usado na medida de resistência do solo à deformação.

A base do equipamento apresenta 38,5 cm<sup>2</sup> e, portanto, a cada um kg aplicado sobre o equipamento, é gerada uma pressão de 2,5 kPa na sua base que está em contato com o solo. No teste realizado, foram avaliadas as pressões de 0, 100, 150, 200, 300 e 400 kPa, sendo coletado solo, com anel volumétrico, no local em que foram aplicadas as cargas visando avaliar a relação entre a carga aplicada e a densidade do solo atingida. Verificou-se que o solo apresentava alta resistência à deformação. Assim, definiu-se que para o estado de maior compactação seria utilizada a máquina agrícola com maior capacidade de aplicação de carga. Para o estado de média compactação seria usado cerca de metade da carga aplicada na maior tensão e, ainda, a testemunha sem aplicação de carga (compactação atual).

A compactação do solo foi realizada a partir de uma passada de máquina sobre toda a parcela. A pressão/carga exercida pelas máquinas disponíveis e selecionadas da propriedade foram calculadas a partir da seguinte equação (O'SULLIVAN et al., 1999):

$$A = s_1BD + s_2L + s_3 L/P_i \quad (1)$$

Onde:

A = área de contato pneu-solo (m<sup>2</sup>)

B = largura do pneu (m)

D = diâmetro do pneu (m)

L = peso sobre o pneu (kN)

P<sub>i</sub> = pressão de inflação do pneu (kPa)

s<sub>1</sub>; s<sub>2</sub> e s<sub>3</sub> = parâmetro empírico para diferentes superfícies

superfície firme:  $s_1 = 0,041$ ;  $s_2 = 0,000$ ;  $s_3 = 0,613$

superfície solta:  $s_1 = 0,310$ ;  $s_2 = 0,00263$ ;  $s_3 = 0,239$

A partir da estimativa da carga/pressão exercida pelos pneus sobre o solo, percebeu-se que a maior pressão seria aplicada por um pulverizador autopropelido (440 kPa), justificando a escolha do mesmo para gerar o maior estado de compactação. O pulverizador autopropelido utilizado para a aplicação dos 440 kPa foi da marca Jacto modelo Uniport, capacidade para 3000 litros de calda, que, carregado, totalizava 13.500 kg. A máquina era equipada com pneus 13.6-38 (34,5 cm de largura e aro de 38 polegadas, inflados com pressão de 45 PSI). Para o estado de compactação intermediário, usou-se um trator John Deere 7505 com uma pá carregadeira acoplada, totalizando 9.000 kg, equipado com pneus dianteiros 480/80 R26 (48 cm de largura e aro de 26 polegadas, inflados com pressão de 26 PSI) e traseiros 650/175 R32 (65 cm de largura e aro de 32 polegadas, inflados com pressão de 26 PSI). A aplicação das cargas nos respectivos tratamentos foi realizada através de uma passagem das máquinas, a uma velocidade de aproximadamente 3 km/h, sendo uma passagem realizada logo ao lado da outra, de forma a trafegar toda a parcela. No momento da aplicação das cargas, o solo se encontrava na condição de consistência plástica (45% de umidade).

### **5.3. Linha do tempo das análises realizadas**

O Quadro 1 apresenta uma síntese mensal das atividades realizadas durante o experimento. Os tratos culturais, como aplicação de defensivos, bem como adubação, seguiram os utilizados pela Agropecuária Santa Clara.

**Quadro 1:** Linha do tempo das atividades realizadas no campo durante o tempo experimental.

Atividades 2018/M	----- Meses do ano -----											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Aplicação das cargas			x									
Escarificação			x									
Coleta de amostras de estrutura preservada			x									
Determinação da RP			x									
Semeadura milho			x									
Dessecação milho					x							
Semeadura aveia+nabo					x							
Semeadura cevada							x					
Dessecação aveia+nabo									x			
Colheita cevada											x	
Ksat in situ											x	
Determinação da RP											x	
Semeadura soja											x	
<b>Atividades 2019</b>	<b>Ja</b>	<b>Fe</b>	<b>Mar</b>	<b>Ab</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ag</b>	<b>Se</b>	<b>Ou</b>	<b>No</b>	<b>De</b>
Coleta de raízes	x											
Colheita soja				x								
Semeadura milho				x								
Dessecação milho						x						
Semeadura aveia+nabo						x						
Semeadura cevada						x						
Ensaio de Proctor									x			
Dessecação aveia+nabo										x		

Colheita cevada										x		
Ksat in situ											x	
Semeadura soja											x	
Determinação da RP											x	
<b>Atividades 2020</b>	<b>Ja</b>	<b>Fe</b>	<b>Mar</b>	<b>Ab</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ag</b>	<b>Se</b>	<b>Ou</b>	<b>No</b>	<b>De</b>
Colheita soja			x									
Coleta de amostras de estrutura preservada				x								
Semeadura aveia+nabo					x							
Semeadura cevada						x						
Dessecação aveia+nabo									x			
Colheita cevada										x		
Ksat in situ											x	
Semeadura soja											x	
Determinação da RP											x	
<b>Atividades 2021</b>	<b>Ja</b>	<b>Fe</b>	<b>Mar</b>	<b>Ab</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ag</b>	<b>Se</b>	<b>Ou</b>	<b>No</b>	<b>De</b>
Colheita soja			x									

#### 5.4. Amostragem de solo

O experimento foi implantado em março de 2018. Nesse mesmo mês foram aplicadas as cargas a fim de gerar os diferentes níveis de compactação. Realizou-se o ensaio de resistência à penetração e foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada para determinação da porosidade, densidade e condutividade hidráulica do solo e amostras deformadas para determinação da umidade. As amostras com estrutura preservada, foram coletadas utilizando cilindros de aço (40 mm de altura e 57 mm de diâmetro), no centro das camadas de 0,05 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m. Medidas de resistência a penetração também foram realizadas em novembro de 2018, 2019 e 2020. Outra coleta de amostras de solo com estrutura preservada, foi realizada

em abril de 2020 a fim de uma caracterização minuciosa dos tratamentos.

## 5.5. Determinações físicas

### 5.5.1. Condutividade hidráulica do solo saturado em laboratório

As amostras com estrutura preservada foram levadas ao laboratório e fixou-se com auxílio de fita isolante outro anel de mesmo diâmetro sobre o anel com solo. Neste anel superior foi colocada a água para realizar a medida. Após fixar o sobre anel, as amostras foram saturadas por capilaridade por 48 horas, até cerca de 3/4 de sua altura. Depois de saturadas, determinou-se a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) por uma adaptação da metodologia de carga decrescente de Reynolds e Elrick (2002), sem a utilização do tanque, sendo expressa pela Equação (2):

$$k_{sat} = \left( \frac{\phi}{\phi_s} \right)^2 \left( \frac{H}{t} \right) \ln \left( \frac{h_0}{h_1} \right), \quad (2)$$

Onde:  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica do solo saturado ( $\text{mm h}^{-1}$ ),  $\emptyset$  é o diâmetro do anel volumétrico sem solo (cm),  $\emptyset_s$  é o diâmetro do anel volumétrico com solo (cm),  $H$ ,  $h_0$  e  $h_1$  são as alturas de referência (cm) e  $t$  é o tempo (s) de deslocamento total da coluna d'água entre  $h_0$  e  $h_1$  (FIGUEIREDO, 2010). As alturas de referência foram obtidas através de um medidor com duas hastes de tamanho diferente, o qual era inserido dentro do sobre anel e contabilizava-se o tempo de deslocamento da água entre uma haste e outra.

### 5.5.2. Condutividade hidráulica do solo saturado *in situ*

A metodologia para determinação da condutividade hidráulica do solo saturado *in situ* é chamada de “*Simplified Falling-Head – SFH*” e foi desenvolvida por Bagarello et al. (2004). Consiste em inserir um cilindro de PVC, com 13 cm de altura e 14 cm de diâmetro a 8 cm no solo. Após, um volume de 330 ml de água é disposto dentro do cilindro e quantifica-se o tempo ele leva para infiltrar

no solo. Como neste método o ensaio em si não é realizado com o solo saturado, e sim com a umidade atual do solo, deve-se coletar uma amostra de solo com estrutura preservada nas proximidades do ensaio para determinar a densidade e a umidade do solo. Além disso, é necessário determinar a densidade de partículas do solo, para possibilitar o cálculo da sua porosidade total. A condutividade hidráulica do solo saturado é obtida através da Equação 3, conforme Bagarello et al., (2004):

$$K_s = \frac{(\Delta\theta)}{(1-\Delta\theta)t_a} \left[ \frac{D}{(\Delta\theta)} - \frac{\left(D + \frac{1}{\alpha^*}\right)}{(1-\Delta\theta)} \ln \left( 1 + \frac{(1-\Delta\theta)D}{(\Delta\theta)\left(D + \frac{1}{\alpha^*}\right)} \right) \right] \quad (3)$$

Onde:  $\Delta\theta$  é a diferença entre a umidade volumétrica no campo e após a saturação em laboratório teste ( $m^3 m^{-3}$ ); D é a altura da lâmina de água correspondente ao volume (L),  $t_a$  é o tempo para infiltração da lâmina de água (s) e  $\alpha^*$  é um parâmetro de textura/estrutura do solo que pode ser estimado de acordo com Elrick e Reynolds (1992).

### 5.5.3. Porosidade do solo

A porosidade total do solo (PT) foi determinada pela relação entre a densidade do solo e a densidade de partículas (TEIXEIRA et al., 2017), conforme Equação 4:

$$PT = \frac{(DP-DS)}{DP} \quad (4)$$

Sendo:

Pt – porosidade total, em  $m^3 m^{-3}$

Dp – densidade de partículas sólidas do solo, em  $Mg m^{-3}$

Ds – densidade do solo, em  $Mg m^{-3}$

No local do experimento a densidade de partículas é de 2,58 Mg m<sup>-3</sup>:

A microporosidade ( $M_i$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) foi calculada pela diferença entre a massa da amostra de solo após cessar a drenagem da água no potencial mátrico de -6 kPa e da amostra seca por 48 horas em estufa a 105°C. Foram considerados microporos, os poros com diâmetro menor que 50 µm, assumindo uma relação aproximada  $d = 3000 / \Psi_m$  10, onde  $d$  é o diâmetro dos poros em µm e  $\Psi_m$  é o potencial matricial em kPa (CARTER; BALL, 1993), conforme a Equação 5:

$$M_i = \frac{U_m - U_e}{V} \quad (5)$$

Onde:  $U_m$  é a massa de solo estabilizada no potencial de -6 kPa,  $U_e$  é a massa do solo seco em estufa e  $V$  é o volume da amostra. A macroporosidade ( $M_a$ ) foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

#### 5.5.4. Densidade do solo

Com as mesmas amostras utilizadas para a macroporosidade, foi determinada a densidade do solo ( $D_s$ ), que também foi empregada na equação de Bagarello et al. (2004). Com a determinação da massa de sólidos secos e determinação do volume dos cilindros utilizados, obteve-se a  $D_s$ , segundo a Equação 6:

$$D_s = \frac{m_{ss}}{V} \quad (6)$$

Sendo:

$D_s$  – Densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>)

$m_{ss}$  – Massa de solo seco em estufa à 105°C (Mg)

$V$  – Volume do cilindro (m<sup>-3</sup>)

### 5.5.5. Permeabilidade ao ar

Após o equilíbrio hidráulico nos potenciais matriciais de -6 kPa e -10 kPa, as amostras de solo foram pesadas e estabelecido um fluxo de ar para quantificar a permeabilidade ao ar ( $k_a$ ). Para essa determinação foi utilizando o permeâmetro proposto por Prevedello e Armindo (2015). Nessa metodologia, à medida que a água ascende numa câmara de ar, o ar adquire uma pressão maior que a atmosférica, fluindo pela amostra de solo e assim movendo uma coluna de água, onde é realizada a mensuração do ar que fluiu pela amostra. A permeabilidade ao ar ( $k_a$ ) é calculada pela densidade de fluxo e pela diferença de pressão entre o ar na câmara e o ar atmosférico (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar ( $q$ ) pode ser calculada segundo a Equação 7:

$$q = (-k_a/\eta)(\partial P/\partial z + \rho g) \quad (7)$$

Sendo, ( $q$ ) [L/T], ( $k_a$ ) a permeabilidade ao ar [L<sup>2</sup>], ( $P$ ) a pressão de ar [M/LT<sup>2</sup>], ( $z$ ) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, ( $\eta$ ) a viscosidade do ar [M/LT], ( $\rho$ ) a densidade do ar [M/L<sup>3</sup>] e ( $g$ ) a aceleração da gravidade [L/T<sup>2</sup>]. A densidade do fluxo corresponde a vazão de ar ( $Q$ ) [L<sup>3</sup>/T] por área perpendicular ao movimento de fluido ( $A_s$ ) [L<sup>2</sup>] e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar, tem-se a Equação 8:

$$k_a = (Q^* \eta/A_s)(\partial z/\partial P) \quad (8)$$

### 5.5.6. Retenção e disponibilidade de água no solo

Para essas determinações também foram utilizadas as amostras de solo com estrutura preservada coletadas nos cilindros. As amostras foram saturadas e submetidas aos potenciais de -1, -3, e -6 kPa nas mesas de tensão e aos potenciais de -10, -33, -100, -200 e -500 kPa nas câmaras de Richards. Após atingirem o equilíbrio hidráulico em cada potencial, as amostras foram

pesadas e assim, foi possível construir a curva de retenção de água. As curvas de retenção de água foram ajustadas conforme Van Genuchten (1980), sendo que os parâmetros empíricos da equação foram calculados a partir de planilha eletrônica do Excel, utilizando o suplemento Solver. Com o uso do psicrômetro WP4, foi determinado o teor de água do solo nos potenciais matriciais de -1000, -1500 e -5000 kPa para a elaboração da parte mais seca das curvas de retenção. Neste método, a umidade na câmara se equilibra com o potencial de água das amostras, sendo este calculado com base na temperatura do solo e do ar, no ponto de orvalho (SCANLON; ANDRASKI; BILSKIE, 2002).

#### 5.5.7. Resistência do solo à penetração

Foram obtidos dados de resistência do solo à penetração (à campo) após a aplicação das cargas na implantação do experimento, com três pontos por parcela e após o cultivo das culturas de inverno com 10 pontos por parcela até 0,40 m de profundidade. Nas proximidades do local das avaliações coletaram-se amostras de solo para a determinação da umidade gravimétrica nas camadas de 0,0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m.

Para esta avaliação foi utilizado um penetrômetro (penetroLOG – Medidor Eletrônico de Compactação do Solo) desenvolvido pela Falker Automação Agrícola, que registra e armazena digitalmente os dados obtidos com medidas de 10 em 10 mm. O equipamento segue as recomendações da norma internacional ASAE S.313.3 (ASAE, 1999) para as dimensões do cone. O cone utilizado foi do tipo 2 com diâmetro de 12,8 mm. A haste foi inserida manualmente a uma velocidade aproximada  $25 \text{ mm s}^{-1}$  com ângulo do cone de  $30^\circ$ .

#### 5.5.8. Ensaio de Proctor normal

O ensaio de Proctor se baseia no princípio de que a compactação do solo é dependente da energia aplicada e da umidade do solo no momento da compactação. Com a equação obtida pela curva de compactação é possível obter matematicamente a máxima densidade e a umidade ótima para

compactação. Este ensaio foi utilizado nos dois estudos, para possibilitar a determinação da densidade relativa no primeiro estudo, bem como para determinar os valores de densidade crítica no estudo 2.

Para o ensaio são necessários em torno de 15 kg de solo seco ao ar, peneirado em peneira de malha 4,8 mm. Estes 15 kg foram separados em 6 amostras de 2,5 kg. Determinou-se a umidade inicial e acrescentou-se água ao solo em uma das amostras afim de obter a umidade referente ao primeiro ponto do ensaio (a umidade do primeiro ponto do ensaio foi diferente entre os solos analisados, (variando de  $0,16 \text{ g g}^{-1}$  a  $0,38 \text{ g g}^{-1}$ ), sendo estimado no momento do umedecimento da amostra, conforme sua consistência. Após umedecido o primeiro ponto, acrescentou-se água as demais amostras de forma que a cada ponto se aumentou o teor de água em 2% (valor sugerido para solos argilosos). As amostras ficam em repouso por 24 horas em sacos plásticos para que ocorra um umedecimento homogêneo.

Para o ensaio, as amostras foram colocadas no cilindro de Proctor normal em três etapas, ou seja, em três camadas com espessura semelhante, sendo que em cada uma delas, o solo é golpeado com 26 batidas com o batedor. Após golpear uma camada, uma pequena escarificação foi realizada na superfície da amostra com auxílio de uma faca, a fim de melhorar o contato com a camada subsequente. Depois das batidas, o cilindro foi pesado com o solo compactado, retirando posteriormente uma amostra do centro do cilindro para determinação da umidade. Descontando o valor da umidade e o peso do cilindro, foi possível determinar a densidade do solo em cada um dos pontos, possibilitando a elaboração da curva de Proctor (relacionando densidade e umidade do solo).

#### 5.5.9. Resiliência do solo

Percebeu-se durante a condução dos trabalhos a dificuldade em aumentar o estado de compactação do solo do presente estudo, assim, decidiu-se realizar uma análise de resiliência do solo. Ela foi determinada de forma semelhante com a proposta de Herrik e Wander (1998), usando a  $D_s$  e  $M_a$  como

indicadores de resiliência do solo. Nas análises de atributos físicos, foi considerada a condição inicial para determinar a resiliência do solo, antes da compactação em laboratório (condição A).

Foram coletadas 21 amostras no centro da camada de 0,00 - 0,20 m e 21 amostras no centro da camada de 0,20 - 0,40 m (7 repetições por carga utilizada). As amostras foram saturadas e colocadas na tensão de -6kPa na mesa de tensão. Após cessar a drenagem, elas foram transferidas ao consolidômetro automático modelo CNTA-IHM/BR-001/07, fabricado pela Masquetto Automação e Equipamentos. A metodologia está descrita na norma NBR 12007/90 (ABNT, 1990). No consolidômetro aplicaram-se pressões verticais contínuas de 200, 400 e 800 kPa durante 30 segundos. Após essa degradação da estrutura por compressão uniaxial, as amostras foram saturadas novamente e drenadas na mesa de tensão a -6 kPa, sendo essa a condição após a compactação em laboratório (condição C0). Para calcular a alteração do volume da amostra, foi utilizado um paquímetro digital, medindo a diferença entre a borda superior do anel e a superfície da amostra (h, cm) em quatro pontos previamente definidos na borda dos anéis.

Após a medição na condição 0, as amostras foram submetidas a quatro ciclos de secagem e umedecimento, os quais são denominados de condição C1, C2, C3 e C4. Cada ciclo completo de secagem e umedecimento consiste em saturar as amostras por 12 horas, drená-las em tensão de -5 kPa em mesa de tensão por 24 horas, “secar” em estufa a 40°C por 24 horas, saturar novamente por 12 horas e colocar em tensão de -6 kPa em mesa de tensão. Ao final de cada ciclo é realizada uma nova medição do volume da amostra conforme descrito acima. Ao final, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas, para o cálculo das Ds. A Ds em cada condição foi calculada, subtraindo-se da altura do anel o valor de h, para cálculo do volume de solo em cada condição.

Os índices de resiliência (Res) e de recuperação (Rec) do solo foram calculados pelas Equações 9 e 10:

$$\text{Resiliência} = (XC4-XC0) / (XA-XC0) \quad (\text{Equação 9})$$

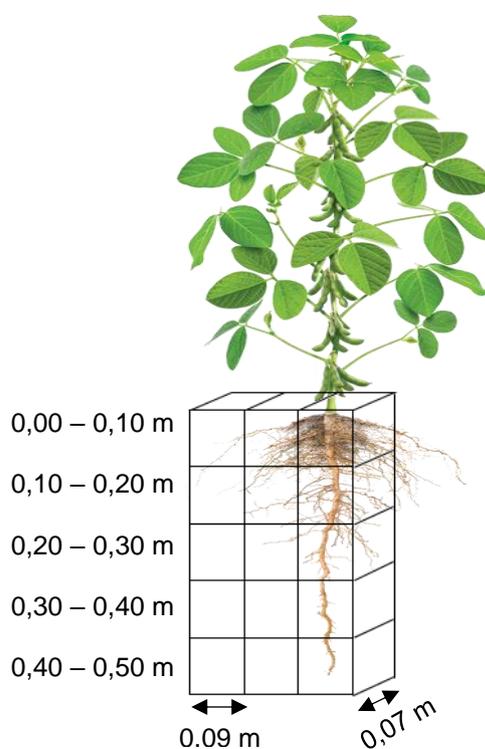
$$\text{Recuperação} = (\text{XC4} - \text{XC0}) \quad (\text{Equação 10})$$

Onde X são os valores de Ds nas condições A, C0 e C4.

## 5.6. Avaliações das culturas

### 5.6.1. Sistema radicular

A coleta de raízes foi realizada pelo método do monólito (BOHM, 1979) no estágio R4 da cultura da soja (estádio com maior presença de raízes). O local de coleta foi escolhido onde tinham três plantas de soja espaçadas em 7 cm, coletando as amostras na planta central de forma a ter as mesmas condições de amostragem em todos os tratamentos. Foram coletados monólitos em cinco profundidades (0,00 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m; 0,20 - 0,30 m; 0,30 - 0,40 m e 0,40 - 0,50 m) e a três distâncias da planta referência (na linha de semeadura coletando 0,045 m para cada lado do colmo, de 0,045 até 0,135 m e de 0,135 até 0,225 m da planta), de forma a abranger linha e entrelinha da semeadura, conforme ilustrado na Figura 3.



**Figura 3:** Ilustração dos monólitos de solo coletados para avaliação das raízes de soja.

As amostras coletadas na forma de monólitos mediam 0,10 m de altura, 0,09 m de largura e 0,07 m de profundidade (referente ao espaçamento entre plantas).

As raízes foram separadas do solo através de lavagem em peneira de 0,05 mm e mantidas em álcool 70% para sua conservação. Após isso, as raízes foram escaneadas em água e utilizou-se o sistema para análise de raízes WinRHIZO, desenvolvido pela empresa canadense *Regent Instruments*. Esta ferramenta permite a análise de raízes através de processamento de imagens digitais para determinação do volume, comprimento, diâmetro, área superficial, número de forquilhas e divisão em classes de diâmetros. Com os dados obtidos no escaneamento, utilizou-se o software Surfer para representação dos resultados na forma de gráficos de isolinhas.

Além do escaneamento, as raízes foram secas em estufa a 65°C, por 96 h para determinação da sua biomassa seca. Posteriormente, foram pesadas em balança semi analítica, com quatro casas decimais. Com os valores gerados pela pesagem, bem como os valores obtidos pelo processamento das imagens, foi possível calcular os parâmetros de raízes por volume do solo, bem como para o perfil de solo até 0,5 m.

#### 5.6.2. Biomassa das plantas

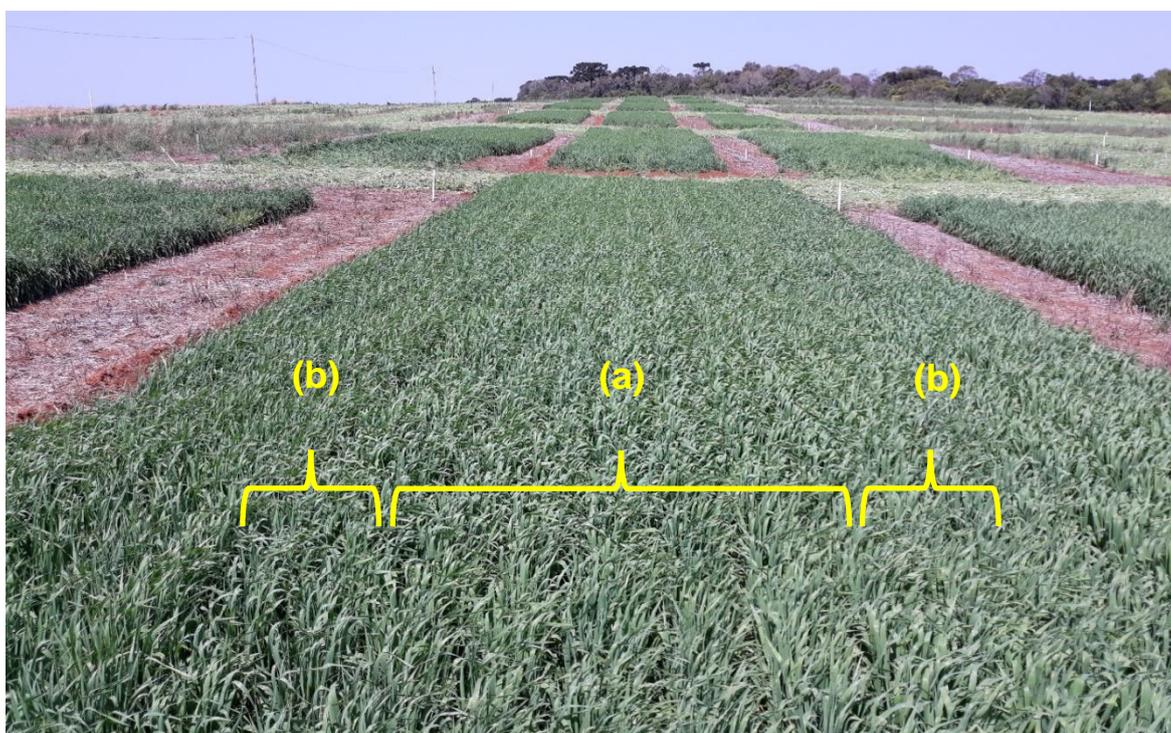
A determinação da biomassa foi realizada para as culturas de inverno, com exceção da cevada. Para o procedimento coletaram-se quatro fileiras de 2,5 m. As plantas foram cortadas rente ao solo, foram levadas para estufa a 65°C até obtenção de massa constante, sendo os resultados expressos em Mg ha<sup>-1</sup>.

#### 5.6.3. Produtividade e componentes de rendimento

Para determinação da produtividade das culturas da cevada e da soja, utilizou-se uma colhedora de parcelas, a qual se coletou 18 m<sup>2</sup> da parte central da parcela (12m x 1,5 m). Nas parcelas com escarificação ainda foram colhidos 10 metros de linha na área mais próxima a extremidade da parcela (onde o pneu

do trator trafegou no momento da sementeira) a fim de verificar o efeito do tráfego sobre a área escarificada. Os resultados foram expressos em  $\text{Mg ha}^{-1}$ , corrigindo a massa de grãos para umidade de 13%. Para a cultura da soja, além da determinação da produtividade, foi avaliado o peso de 1.000 sementes (PMS) na primeira safra.

Nas áreas escarificadas, percebeu-se que o solo sofreu deformações no local de passagem dos rodados do trator e da sementeira. Por este motivo, na primeira safra de cevada e de soja, essa área foi colhida separadamente de forma manual, a fim de verificar possíveis diferenças de produtividade neste local. Conforme ilustrado na Figura 4.



**Figura 4:** Parcela com cevada onde, na área escarificada, a parte (a) foi colhida com a colhedora de parcela e nas partes (b), referentes aos locais que o trator trafegou na sementeira, foram colhidas manualmente.

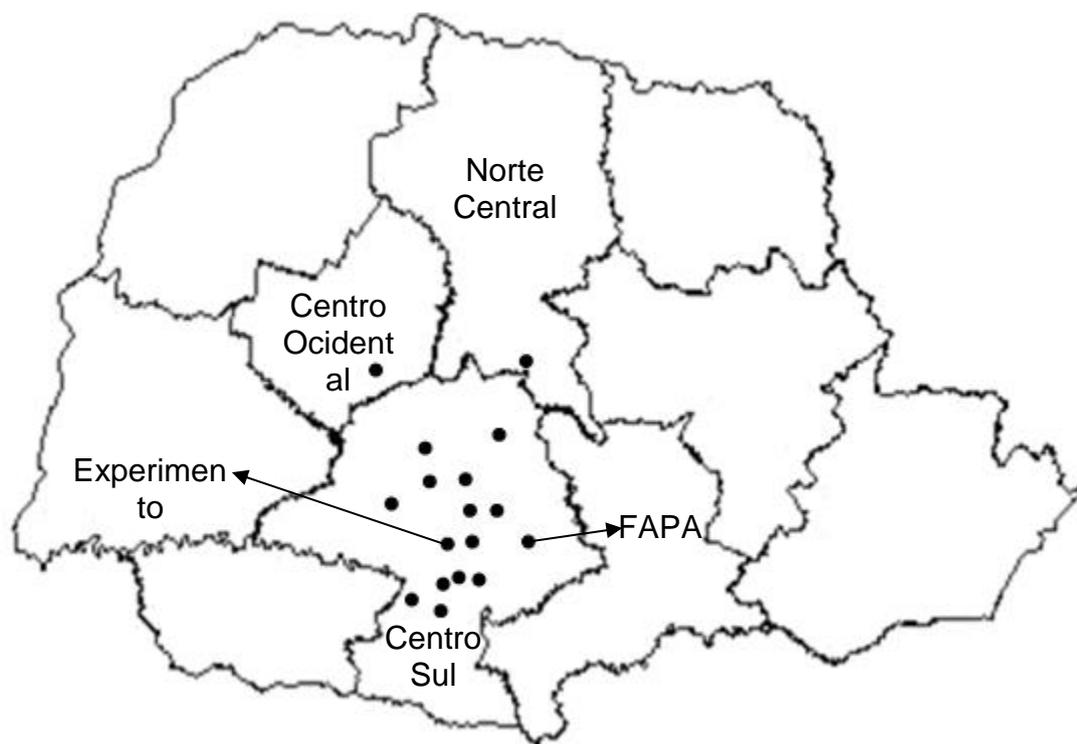
### 5.7. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise estatística utilizando software Assistat 7.7 e, quando foi necessário fazer algum desdobramento das

interações, utilizou-se o software Sisvar. Os procedimentos estatísticos de comparação de resultados das análises realizadas foram escolhidos com base no delineamento experimental do estudo (trifatorial com parcelas subdivididas). Primeiramente foram testados os pressupostos da análise variância (distribuição normal e homogeneidade de variâncias). Quando os pressupostos não foram atendidos, foram realizadas transformações dos dados a fim de ser possível o uso de modelos estatísticos paramétricos. Quando atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância e, havendo efeito de tratamento, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Os gráficos foram elaborados utilizando o software estatístico SigmaPlot 14.0 e o Microsoft Excel.

### **5.8. Segundo estudo**

Foram coletadas amostras de solo em 20 locais afim de abranger uma diversidade de teores de argila, bem como de matéria orgânica do solo, para realização do ensaio de Proctor. A amplitude entre os pontos mais extremos é de em torno 160 km no sentido Norte-Sul e de 110 km no sentido Leste-Oeste. Os pontos em sua maioria se situam na região Centro Sul do Paraná. No entanto, também foram coletadas amostras de solo na região Centro Ocidental e outra na Norte Central. A distribuição dos pontos de coleta está apresentada na Figura 5.



**Figura 5:** Distribuição dos pontos de coleta no Estado do Paraná para determinação da densidade máxima do solo.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Primeira ação de pesquisa – Eficiência de métodos culturais e práticas mecânicas na descompactação em diferentes estados de compactação em Latossolo

#### 6.1.1. Caracterização do solo após a aplicação das cargas

Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 13 de março de 2018 (data da aplicação das cargas) até 15 de março de 2018 (data da semeadura do milho). Logo após a aplicação das cargas na implantação do experimento (a fim de gerar diferentes níveis de compactação), foi realizada a escarificação do solo. Após isso, foi realizada a coleta de amostras de solo com estrutura preservada para determinação da densidade, porosidade, condutividade hidráulica saturada e retenção de água no solo, bem como a primeira medida de resistência a penetração.

A umidade do solo estava em 45% no momento da aplicação das cargas, valor muito próximo do ideal para a compactação. Anteriormente, no local do experimento, haviam ocorrido precipitações de 24 mm, 7 mm, 6 mm e 20 mm, respectivamente aos 11; 10; 9 e 7 dias antes da aplicação das cargas.

##### 6.1.1.1. Densidade e porosidade do solo

Logo após a aplicação das cargas, o solo não sofreu reduções significativas no seu volume de poros, mantendo semelhantes os valores de densidade das áreas compactadas e não compactadas em todas camadas avaliadas. Os valores de densidade obtidos estão apresentados na Tabela 3.

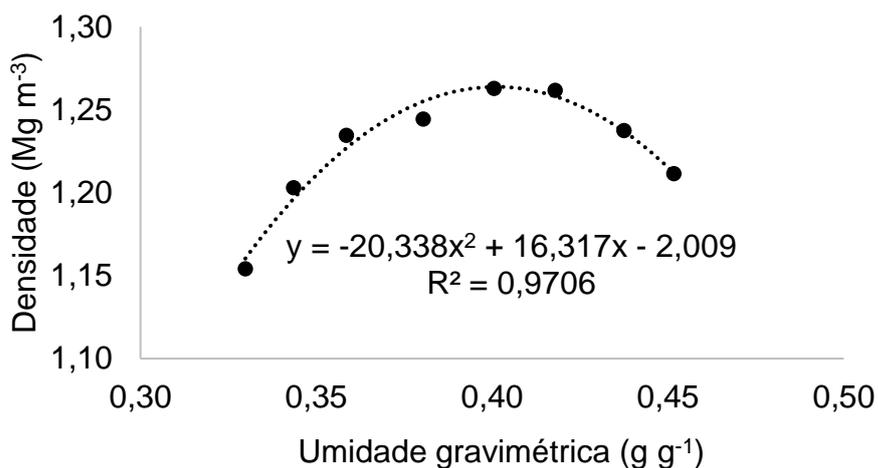
**Tabela 3:** Densidade do solo após a aplicação das cargas nas camadas de 0,5 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade.

Profundidade (m)	Tratamentos		
	0 kPa	220 kPa	440 kPa
	-----Densidade (Mg m <sup>-3</sup> )-----		
0,05 - 0,10 <sup>ns</sup>	1,06	1,05	1,08
0,10 - 0,15 <sup>ns</sup>	1,07	1,07	1,09
0,15 - 0,20 <sup>ns</sup>	1,06	1,03	1,04
0,20 - 0,30 <sup>ns</sup>	1,01	0,99	1,00

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

Essa baixa ou inexistente alteração da densidade do solo após a aplicação das cargas se deve principalmente ao alto teor de matéria orgânica deste solo (6% na superfície e 5% na camada de 0,20 - 0,30 m) (SOANE, 1990). A matéria orgânica confere efeito elástico ao solo (MENEZES, PUIA; MACHADO, 2020), que mesmo sofrendo deformações, rapidamente retorna a uma condição semelhante a anterior.

Com o intuito de verificar a densidade relativa alcançada com a aplicação das cargas no solo em estudo, realizou-se o ensaio de Proctor Normal para determinar a densidade máxima do solo, cujo valor foi de 1,26 Mg m<sup>-3</sup> (Figura 6).



**Figura 6:** Curva de Proctor para a camada de 0,00 - 0,20 m do Latossolo do estudo.

O valor de densidade relativa, que é a relação entre a densidade atual do solo e a densidade obtida no teste de Proctor, chegou a apenas 86% da densidade máxima na parcela em plantio direto onde foi aplicada a carga de 440 kPa, distante de uma densidade relativa considerada crítica para o desenvolvimento das culturas.

Nas mesmas amostras nas quais foi determinada a densidade, foi determinada a porosidade do solo, cujos valores são apresentados na Tabela 4.

A porosidade do solo permitiu observar efeitos da compactação. De forma geral, houve uma diminuição da macroporosidade (significativo apenas na camada de 0,20 - 0,30 m) e aumento da microporosidade (significativo nas camadas de 0,10 - 0,15 m e 0,20 - 0,30 m) com a aplicação da carga de 440 kPa. Podendo ser justificado pela distribuição da carga no perfil do solo, bem como pelo menor teor de matéria orgânica nesta camada, quando comparada a camadas mais superficiais, o que confere menor elasticidade do solo a esta camada. No entanto, entre a carga de 220 kPa e a área sem compactação não ocorreram diferenças significativas em nenhuma das camadas avaliadas. As alterações ocorridas na área com aplicação da carga de 440 kPa se dão pela transformação de macroporos em microporos, causada pelo tráfego dos rodados, conforme já relatado por (SILVA, LIBARDI; CAMARGO, 1986).

**Tabela 4:** Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo após a aplicação das cargas nas camadas de 0,05 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade.

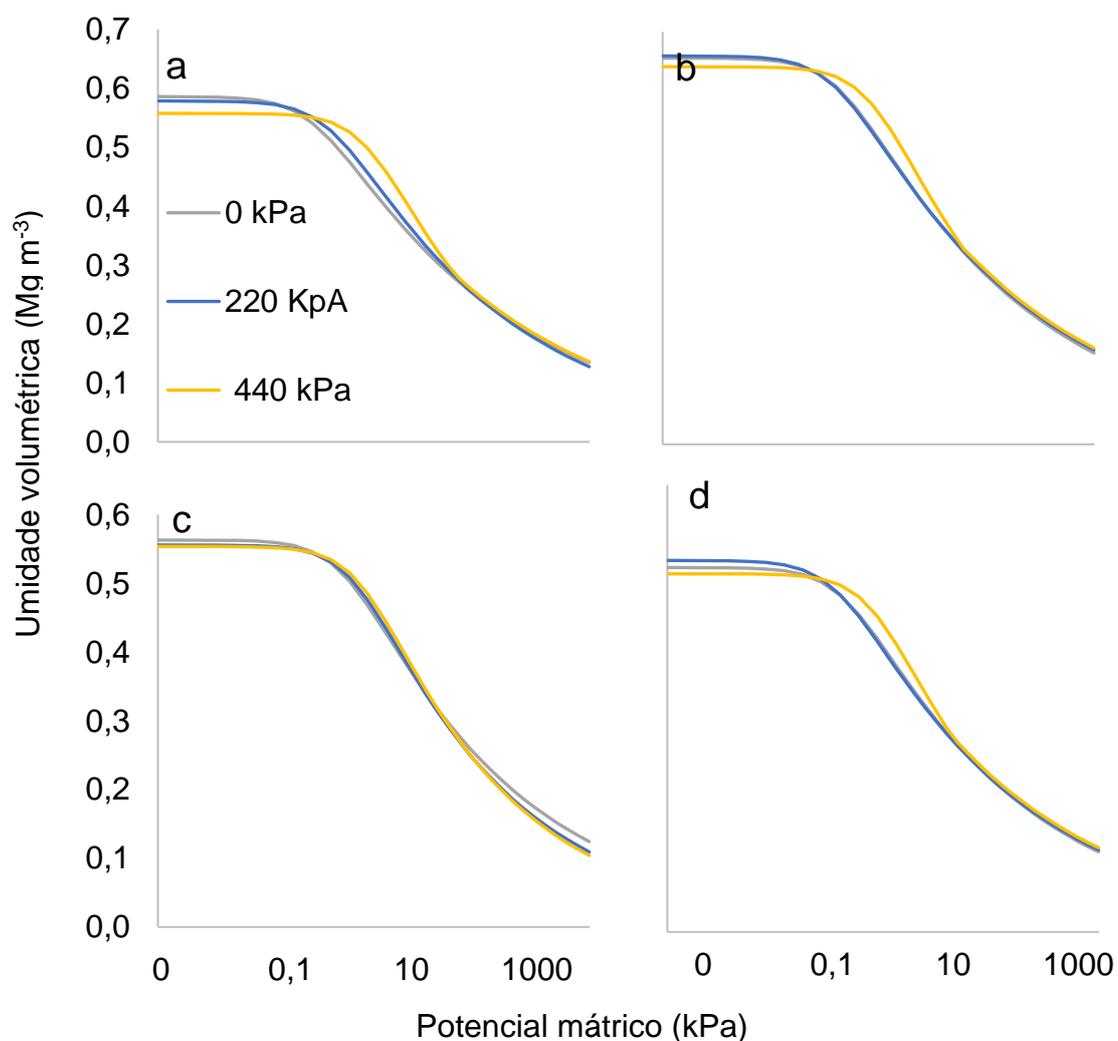
Profundidade (m)	Parâmetro (%)	Tratamentos		
		0 kPa	220 kPa	440 kPa
0,05 - 0,10	Ma <sup>ns</sup>	7,8	8,6	5,5
	Mi <sup>ns</sup>	51,1	50,8	52,6
	PT <sup>ns</sup>	58,9	59,4	58,1
0,10 - 0,15	Ma <sup>ns</sup>	8,2	8,3	5,7
	Mi	50,4 b	50,4 b	51,9 a
	PT <sup>ns</sup>	58,5	58,5	57,6
0,15 - 0,20	Ma <sup>ns</sup>	8,1	9,2	7,7
	Mi <sup>ns</sup>	50,9	51,0	51,9
	PT <sup>ns</sup>	59,0	60,2	59,6
0,20 - 0,30	Ma	9,3 ab	10,6 a	8,6 b
	Mi	51,5 ab	51,1 b	52,6 a
	PT	60,8	61,7	61,2

Letras iguais na linha indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

Hillel (1970) afirma que o solo deve conter pelo menos 6% de macroporos para um perfeito desenvolvimento das culturas. Nas camadas de 0,05 - 0,10 m e 0,10 - 0,15 m, quando aplicado a carga de 440 kPa, os valores de macroporosidade foram de 5,5 e 5,7% respectivamente, não atendendo, desta forma, o mínimo afirmado pelo autor, o que pode, portanto, acarretar problemas ao desenvolvimento das culturas.

### 6.1.1.2. Retenção de água no solo

Elaborou-se uma curva de retenção de água para cada profundidade estudada, contendo em cada uma as três cargas aplicadas. As curvas estão apresentadas na Figura 7.



**Figura 7:** Curvas de retenção de água no solo após a aplicação das cargas nas camadas de 0,05 - 0,10 m (a), 0,10 - 0,15 m (b), 0,15 - 0,20 m (c) e 0,20 - 0,30 (d) m de profundidade.

Entre os tratamentos estudados, percebe-se que a área com maior compactação (440 kPa), reteve menos água na parte inicial da curva, ou seja, na parte úmida da curva devido a menor macroporosidade. A partir da tensão de 0,1 kPa já ocorre maior retenção de água neste mesmo tratamento. Os tratamentos com cargas 0 e 220 kPa apresentaram curvas semelhantes, com as

linhas sendo sobrepostas na maior parte das mesmas. Com as curvas de retenção de água é possível determinar a quantidade de água disponível, que consiste no conteúdo de água entre os potenciais de -10 kPa (denominado de capacidade de campo) e de -1500 kPa (denominado ponto de murcha permanente). A quantidade de água disponível está apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5:** Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) após a aplicação das cargas, nas camadas de 0,05 - 0,10 m; 0,10 - 0,15 m; 0,15 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m de profundidade.

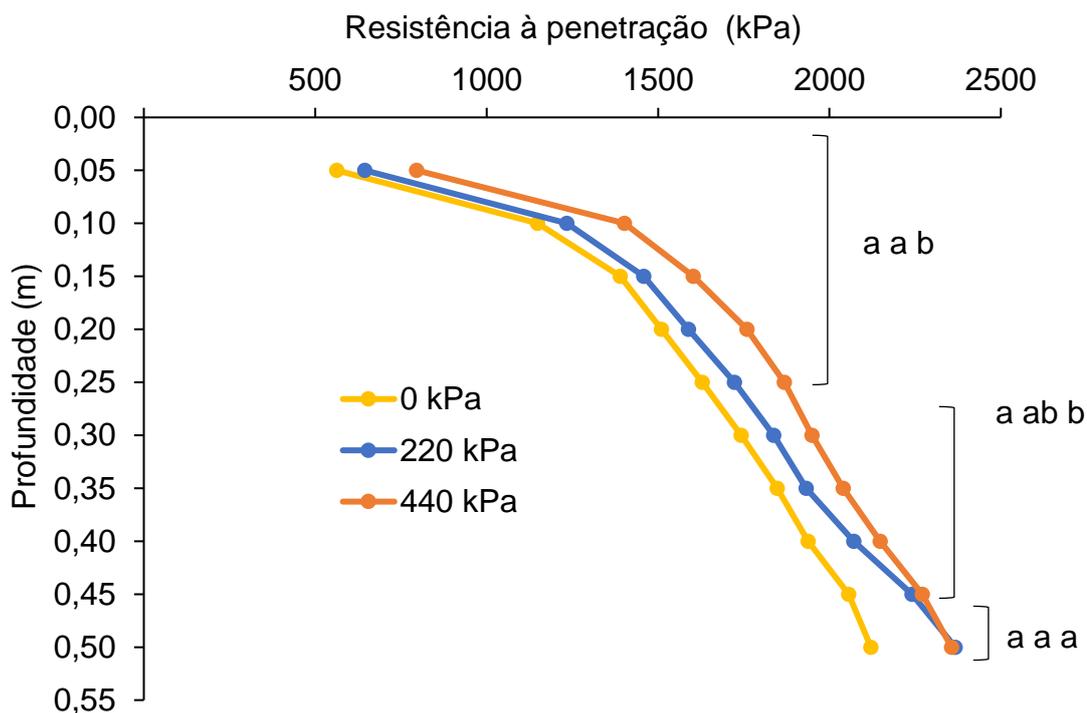
Profundidade (m)	Tratamentos		
	0 kPa	220 kPa	440 kPa
	-----Água disponível (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )-----		
0,05 - 0,10 <sup>ns</sup>	0,19	0,20	0,26
0,10 - 0,15 <sup>ns</sup>	0,20	0,20	0,25
0,15 - 0,20 <sup>ns</sup>	0,22	0,23	0,25
0,20 - 0,30	0,20 b	0,21 ab	0,26 a

Letras iguais na linha indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

De forma geral, o tratamento que recebeu a carga de 440 kPa apresentou os maiores valores de água disponível (significativo na camada de 0,20 - 0,30 m). Tal fato é explicado pela menor macroporosidade e maior microporosidade deste tratamento. Conforme concluído por Reichert et al. (2017), os sistemas de manejo do solo com maior microporosidade, também foram os sistemas com maior volume de água disponível.

#### 6.1.1.3. Resistência à penetração do solo (RP)

A medida foi efetuada pelo equipamento a cada 0,01 m de profundidade até a camada de 0,50 m, porém os valores usados no gráfico, bem como na análise estatística, são uma média de camadas de 0,05 m. Os resultados estão apresentados na Figura 8.



**Figura 8:** Resistência à penetração do solo (kPa) nos diferentes níveis de compactação. \*A direita Teste de Tukey a 5% de probabilidade entre os níveis de compactação (tratamentos com letras iguais na linha não diferem entre si). Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

Entre as profundidades de 0,00 m e 0,25 m, os tratamentos com cargas aplicadas de 0 e 220 kPa apresentaram menores valores de RP em relação ao tratamento com 440 kPa. Entre as profundidades de 0,20 e 0,45 m, o tratamento 0 kPa apresentou a menor RP, enquanto o 440 kPa a maior, tendo o tratamento de 220 kPa apresentado valores intermediários, não diferindo dos demais. Na profundidade de 0,50 m, os tratamentos não diferindo entre si, podendo-se inferir que a efetividade da compactação provocada pelos rodados se deu até a profundidade de 0,45 m.

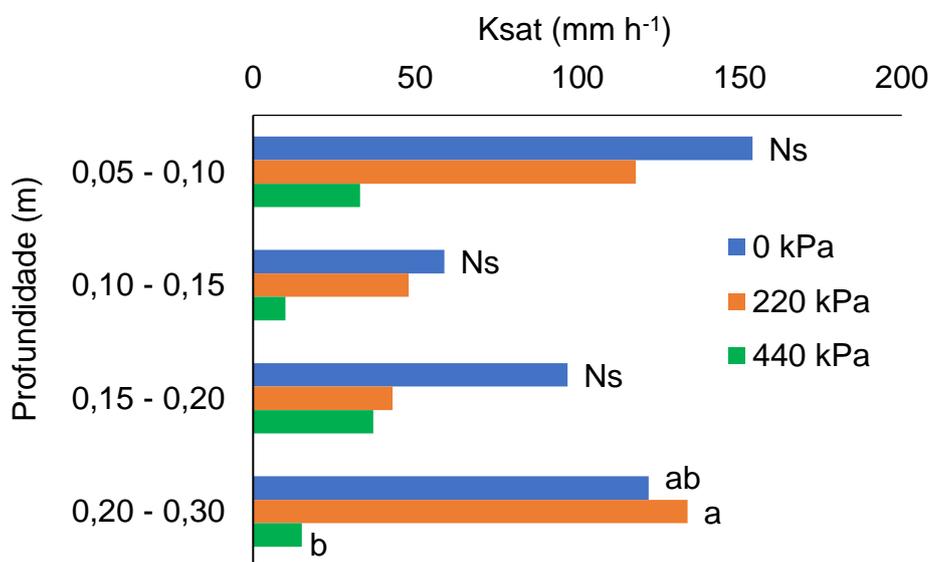
No momento da medida da RP, a variação da umidade do solo entre os tratamentos e nas profundidades avaliadas foi baixa, não diferindo estatisticamente (Tabela 6).

**Tabela 6:** Teor de água do solo no momento da medida de resistência à penetração (RP), no mês de março de 2018.

Profundidade (m)	Nível de compactação		
	0	220	440
	-----Umidade gravimétrica (g g <sup>-1</sup> ) -----		
0,00 - 0,10	0,48	0,50	0,49
0,10 - 0,20	0,46	0,48	0,47
0,20 - 0,40	0,48	0,49	0,48

#### 6.1.1.4. Condutividade hidráulica do solo saturado

Para determinação da Ksat em laboratório foram utilizados os mesmos anéis coletados para determinação da densidade, logo após a aplicação das cargas. Os resultados estão apresentados na Figura 9.



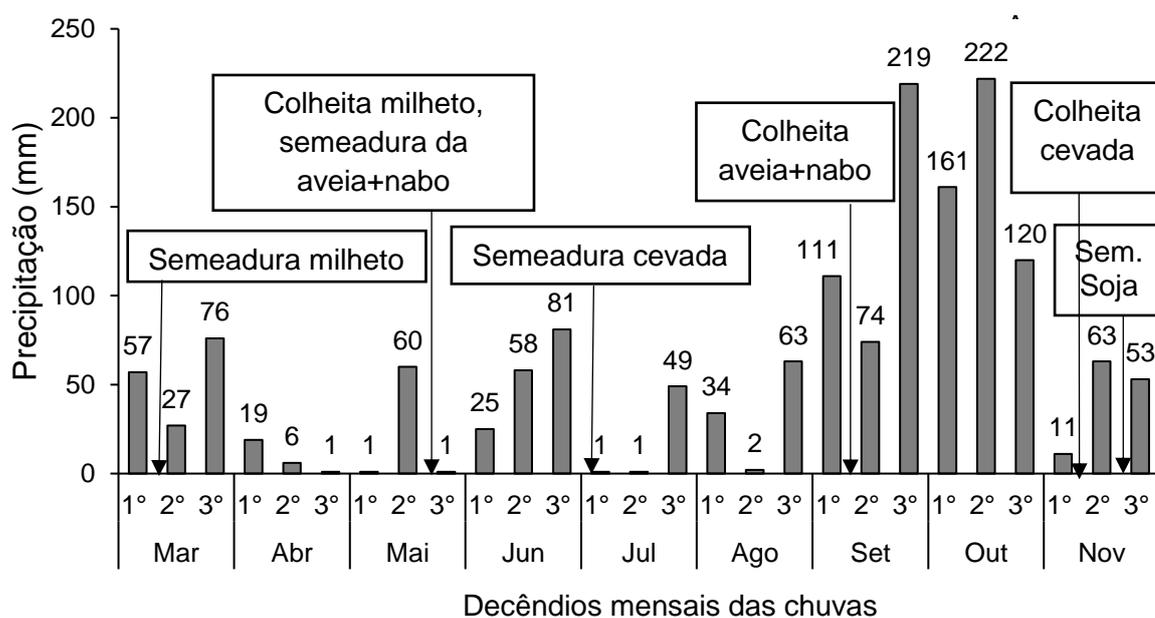
**Figura 9:** Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat - mm h<sup>-1</sup>) para os diferentes níveis de compactação (0, 220 e 440 kPa) nas diferentes camadas estudadas. Barras seguidas da mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, Ns= não significativo.

Apesar de terem sido feitas doze repetições por tratamento, a medida da Ksat em laboratório teve alta variabilidade, apresentando coeficiente de

variação de até 250%. Outros autores como Santos et al. (2012), Scherpinski et al. (2010) e Silva 2020 também constataram altos coeficientes de variação para  $K_{sat}$ . Por isso, mesmo com grandes variações nas médias, a análise estatística mostrou diferença somente na camada de 0,20 - 0,30 m. Nesta camada, a área mais compactada (440 kPa) apresentou a menor  $K_{sat}$ , porém não diferindo da área com 0 kPa. No entanto, ao analisar os dados “brutos”, verifica-se que os maiores valores de condutividade ocorreram na área sem compactação, diminuindo a  $K_{sat}$  com o aumento do estado de compactação induzido pelas cargas, conforme o esperado. Logo, esse parâmetro se mostrou sensível para mostrar as alterações causadas pela aplicação das cargas, permitindo concluir que apesar de ocorrerem poucas variações da relação massa/volume, o arranjo e conectividade dos poros foi afetada pela compactação.

6.1.2. Análises realizadas durante e após o primeiro ciclo de culturas de outono/inverno

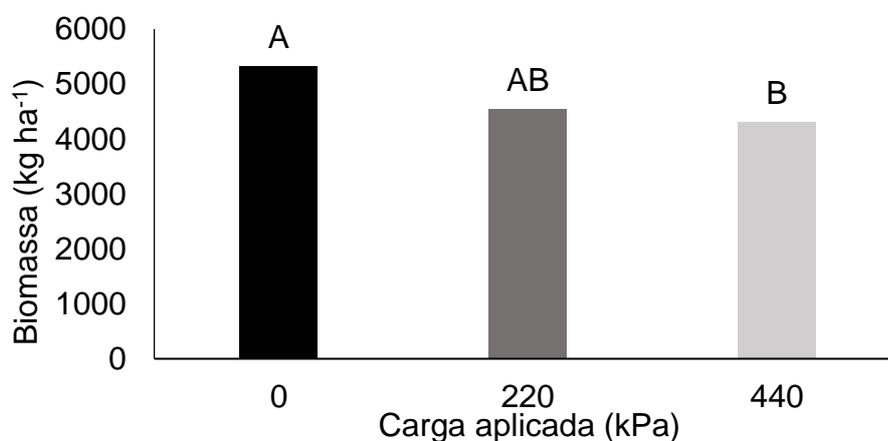
Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 15 de março de 2018 (data da semeadura do milho) até 22 de novembro de 2018 (data da semeadura da soja). Englobam, portanto, a semeadura e colheita do milho, semeadura e colheita da aveia+nabo, semeadura e colheita da cevada, bem como as análises do solo de condutividade hidráulica saturada *in situ* e de resistência do solo à penetração (RP). A precipitação deste período está apresentada na Figura 10.



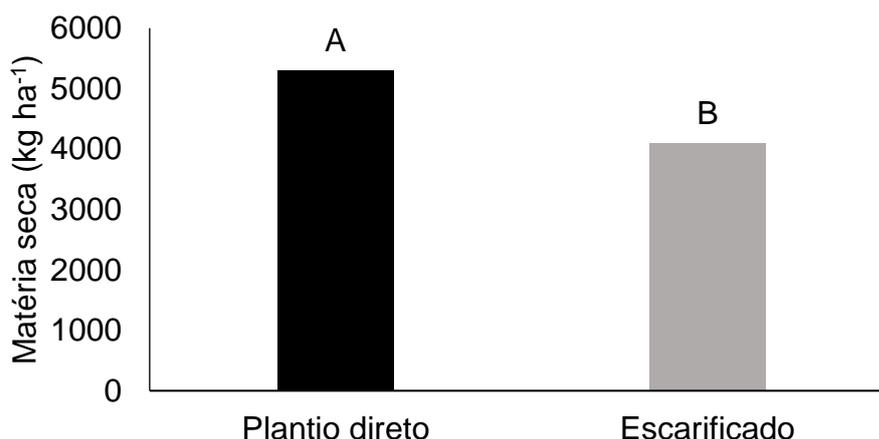
**Figura 10:** Decêndios mensais com as chuvas ocorridas entre os meses de março e novembro de 2018.

#### 6.1.2.1. Produtividade de biomassa de milho

No ano de 2018, a temperatura foi relativamente boa para o desenvolvimento do milho (média de 19°C, média mínima de 14°C, e média máxima de 26°C), além da baixa precipitação no período (186 mm). Neste primeiro ano, tanto as cargas aplicadas, quanto os sistemas de manejo tiveram efeito significativo no desenvolvimento do milho (Figuras 11 e 12).



**Figura 11:** Produção de biomassa do milho em função da carga aplicada na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



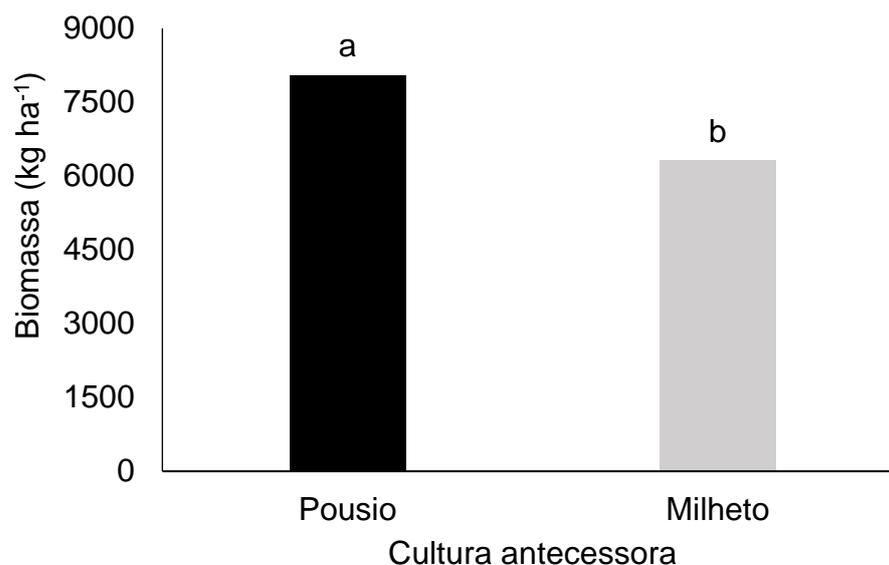
**Figura 12:** Produção de biomassa do milho em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Conforme esperado, a aplicação de cargas causou redução na produtividade de biomassa de milho. Conforme apresentado nos itens anteriores, a compactação diminuiu a macroporosidade do solo, o que possivelmente contribuiu para um menor desenvolvimento da cultura.

A menor produtividade causada pela escarificação pode estar relacionado ao fato de a semeadura ter sido realizada logo após a prática. Como o solo fica mais solto, o contato entre semente e solo é reduzida, dificultando, portanto, o estabelecimento da cultura. Além de que, devido à rugosidade do solo na área escarificada, a profundidade de distribuição das sementes no momento da semeadura ficou comprometida em alguns trechos, dificultando a germinação e, conseqüentemente, o desenvolvimento da cultura.

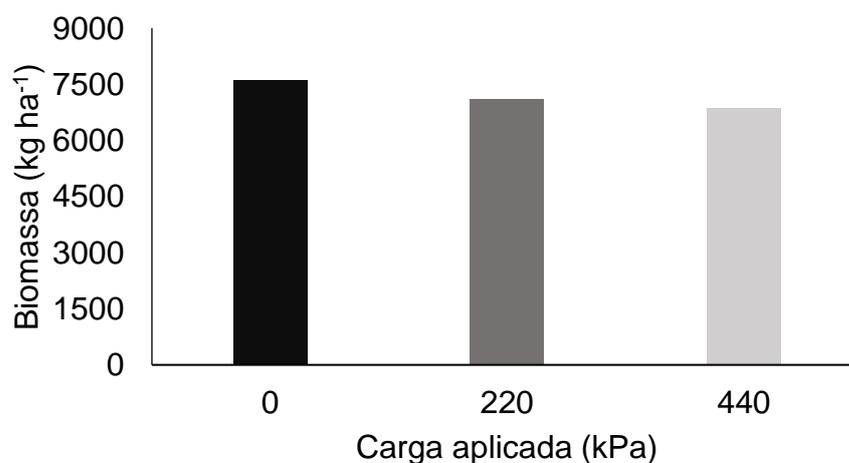
#### 6.1.2.2. Produtividade de biomassa de aveia+nabo

No primeiro ano, o nabo prevaleceu sobre a cultura da aveia, onde esta quase não se estabeleceu na área. Estas culturas foram semeadas tanto no tratamento em que havia sido cultivado milho, como naquelas que estavam em pousio até maio de 2018. A interação entre os fatores estudados não foi significativa. Os dados serão, portanto, apresentados separadamente para cada fator de tratamento (Figuras 13, 14 e 15).



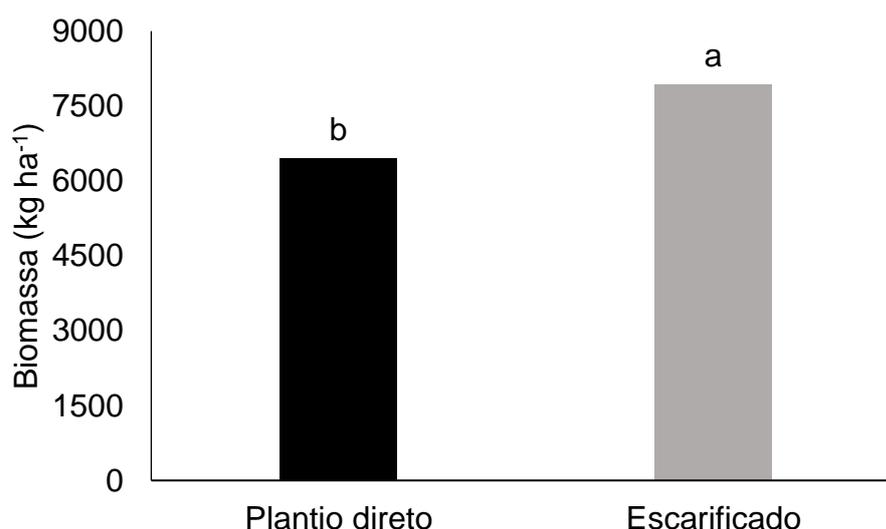
**Figura 13:** Produção de biomassa de aveia+nabo em função da cultura antecessora na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A área que estava em pousio produziu maior quantidade de biomassa em relação a área cultivada anteriormente com milho. Isso pode estar relacionado ao preenchimento dos poros do solo com as raízes do milho, dificultando assim o desenvolvimento das raízes do nabo. Além disso, como as plantas de cobertura não receberam adubação, o que pode ter causado uma competição por nutrientes, onde os resíduos do milho provocaram uma imobilização dos mesmos por um período de tempo.



**Figura 14:** Produção de biomassa de aveia+nabo em função da carga aplicada na safra de 2018.

Embora a produtividade de biomassa de aveia+nabo ter apresentado uma pequena redução com o aumento da carga aplicada, a mesma não foi significativa. Assim pode-se inferir que o nabo é uma cultura de alto vigor e ter potencial de se desenvolver bem, mesmo em níveis mais críticos de compactação. Outra explicação seria pelo comportamento resiliente do solo, sendo que o mesmo já apresentava boas condições no momento do cultivo do nabo. Lopes (2017), trabalhando com um Latossolo da região, no entanto em casa de vegetação, concluiu que o nabo se desenvolveu normalmente mesmo em elevados níveis de compactação, corroborando com os dados obtidos neste experimento.



**Figura 15:** Produtividade de biomassa de aveia+nabo em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Diferentemente do milho, o consórcio aveia+nabo se desenvolveu melhor na área com a escarificação. Isso pode ser explicado pelo fato de a semeadura ter sido realizada cerca de dois meses após a escarificação. Esse período permitiu uma acomodação do solo pela precipitação, e este

apresentava, portanto, uma superfície mais homogênea, ocasionando desta forma uma semeadura de maior qualidade.

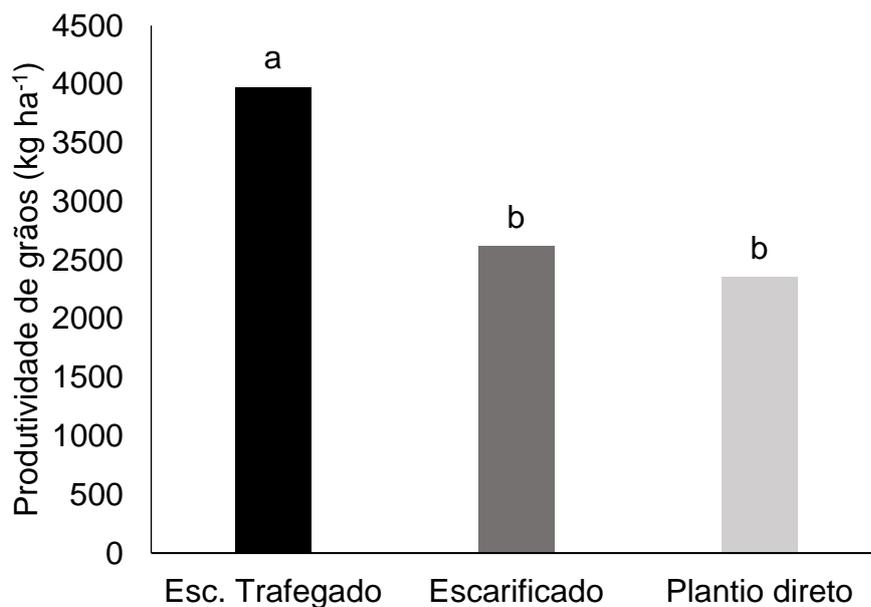
Outro fato é que pela cultura do nabo apresentar um sistema radicular pivotante, com a raiz principal robusta. Esta, apesar de ser capaz de se desenvolver em solos compactados, pode ter potencial de desenvolver-se melhor em um solo solto, conseqüentemente, com maior desenvolvimento da parte aérea. O mesmo comportamento foi relatado por Nicoloso et al., (2008).

#### 6.1.2.3. Produtividade de cevada

A cevada apresentou baixa produtividade de grãos em todos os tratamentos. Tal fato aconteceu devido ao excesso de chuvas no local durante o amadurecimento da cultura (cerca de 400 mm nos 30 dias antecedentes à colheita).

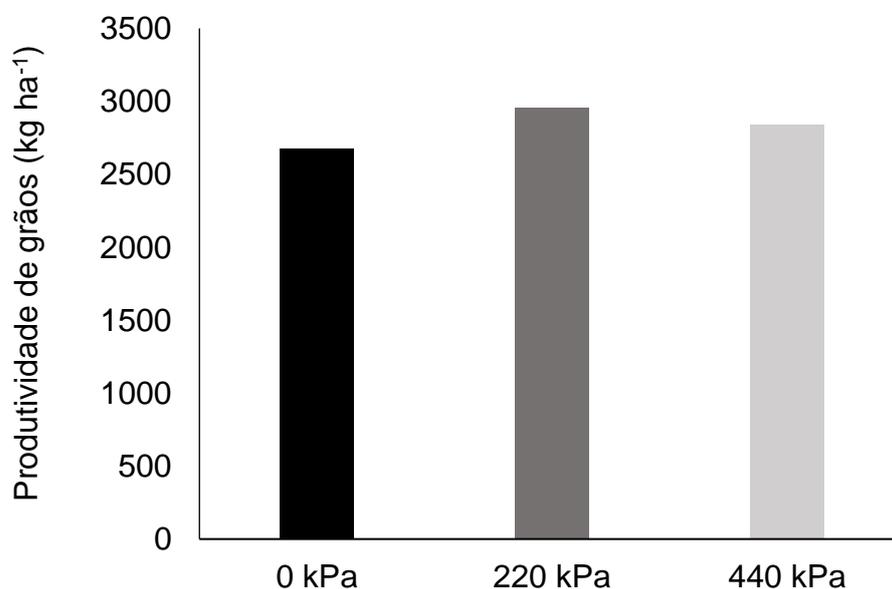
Nesta safra, apenas os sistemas de preparo causaram diferença na produtividade, onde justamente a área escarificada trafegada (b – Figura 4) apresentou a maior produtividade (Figura 16).

Onde a área com escarificação e com tráfego de rodados da semeadura permitiu um melhor contato entre o solo e a semente e, posteriormente, com as raízes. Atrelado a isso, a escarificação por ter causado uma maior aeração ao solo, permitiu uma maior atividade biológica nesta área, facilitando a decomposição da matéria orgânica e aumentando, portanto, a disponibilidade de nutrientes, conforme relatado por Pavinato e Rosolem (2008).



**Figura 16:** Produtividade de cevada em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2018. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados de produtividade da cevada em função dos níveis de compactação estão apresentados na Figura 17.



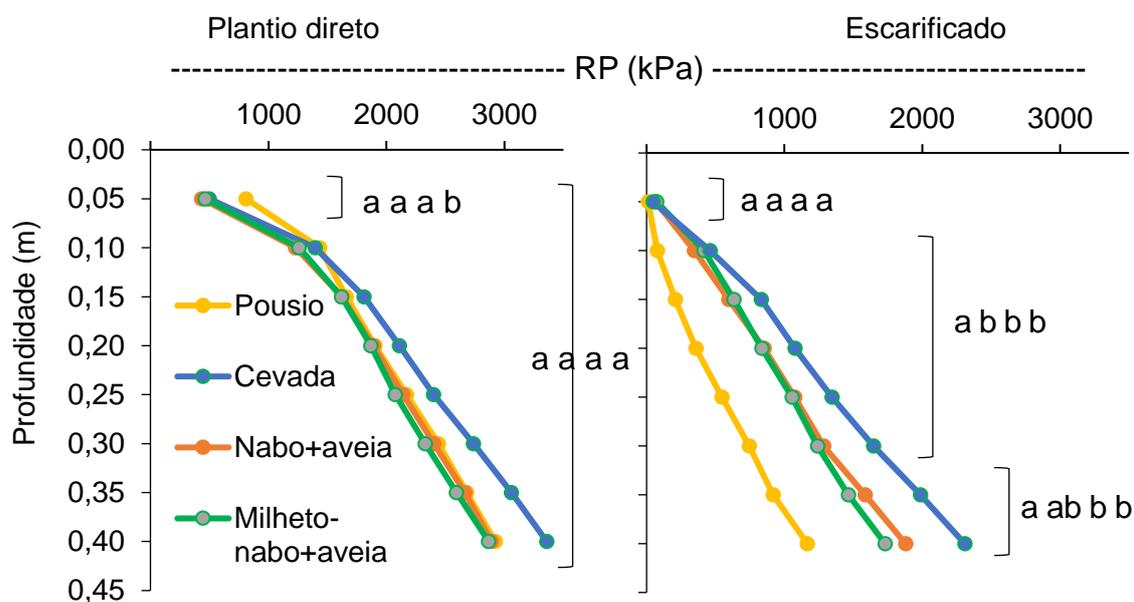
**Figura 17:** Produtividade de cevada em função dos níveis de compactação aplicados na safra de 2018.

Os níveis de compactação novamente não causaram diferenças na produtividade da cevada, podendo ser explicado pelos mesmos motivos

supracitados, como a resiliência do solo ou até mesmo a características da cultura.

#### 6.1.2.4. Resistência à penetração do solo (RP)

A segunda medida de RP foi realizada no mês de novembro, no final do ciclo das culturas de inverno, antecedendo à semeadura da cultura de verão (soja). Portanto, diferentemente da primeira medida, nesta segunda, além dos diferentes níveis de compactação, se tem também o efeito dos tratamentos sistemas de cultura de inverno (pousio, cevada, aveia+nabo, milho/aveia+nabo), bem como dos sistemas de preparo (plantio direto e escarificado). Em todas as profundidades estudadas ocorreu efeito significativo nas interações duplas “culturas de inverno x sistema de preparo” e “níveis de compactação x sistema de preparo”. Na Figura 18 estão apresentados os resultados de RP referentes à interação “culturas de inverno x sistema de preparo”.



**Figura 18:** Resistência à penetração do solo (kPa) na interação entre os fatores sistema de culturas e preparo do solo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação entre os sistemas de cultura dentro de cada preparo, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

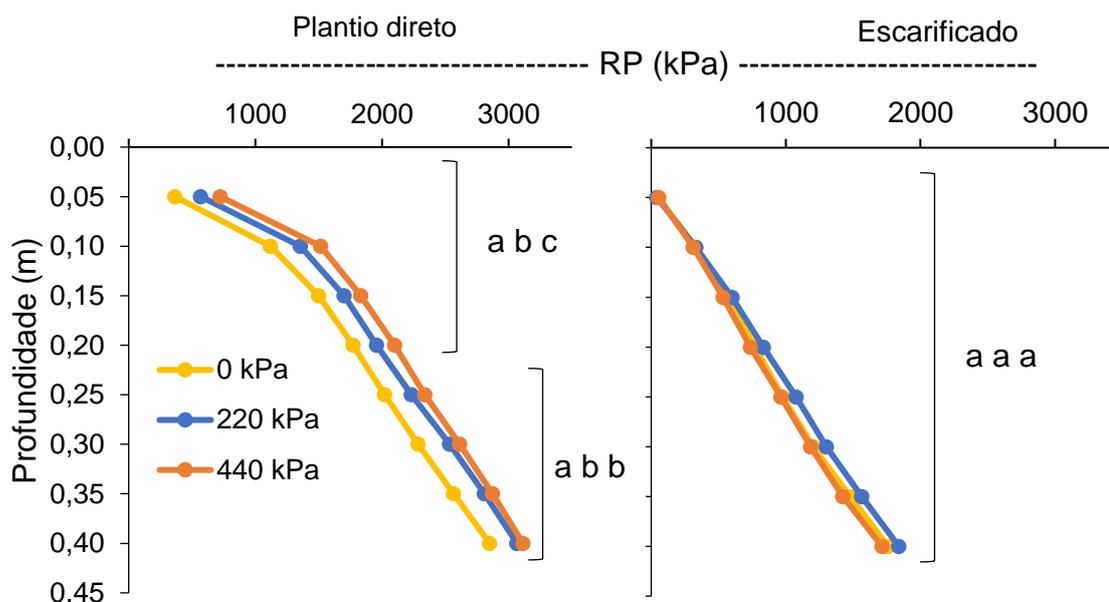
Comparando os sistemas de culturas, no plantio direto, a única profundidade que apresentou diferença significativa foi a camada 0,00 - 0,05 m, onde o tratamento com o sistema pousio apresentou o maior valor de RP. Isso ocorreu porque o solo em pousio fica exposto aos agentes climáticos como o sol e a chuva, facilitando desta forma sua degradação (SEQUINATO et al., 2014) e causando aumento na RP. A superfície do solo em pousio é apresentada na Figura 19.



**Figura 19:** Superfície do solo após pousio hiberna.

No sistema escarificado, não ocorrerem diferenças nos valores de RP até a camada de 0,05 m. Entre as camadas de 0,05 m e 0,30 m, o pousio apresentou os menores valores de RP. Tal fato é explicado pela desagregação do solo causada pelo escarificador e, nas áreas com culturas, além da agregação causada pelas raízes das plantas, a própria passagem do trator com a semeadora já foi suficiente para uma acomodação deste solo, justificando o aumento na RP. Nas últimas camadas (0,30 - 0,40 m), a área em pousio continuou apresentando os menores valores de RP, porém não diferindo da área

com milho/aveia+nabo. Os demais tratamentos apresentaram maiores valores de RP do que o pousio e não diferiram do tratamento milho/aveia+nabo. Este comportamento nos permite dizer que neste tratamento ocorreu um efeito de agregação biológica causada pelo milho, causando redução na RP do solo. Os resultados de RP para a interação “níveis de compactação x sistemas de preparo” estão apresentados na Figura 20.

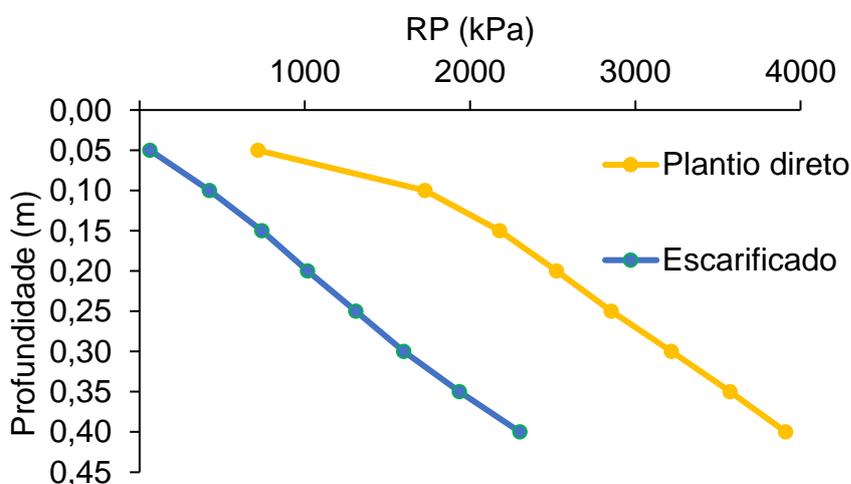


**Figura 20:** Resistência à penetração do solo (kPa) na interação entre os fatores níveis de compactação e preparo do solo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação entre os sistemas de cultura dentro de cada preparo, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

Em relação às cargas, estas somente causaram variação na RP na área em plantio direto, onde todos os tratamentos diferiram entre si até a camada de 0,20 m, sendo que a menor RP ocorreu na carga 0 kPa, seguido da carga de 200 kPa e, por fim, a de 440 kPa. Porém, entre as camadas de 0,20 m e 0,40 m apenas o tratamento 0 kPa diferiu dos demais. Isso pode estar relacionado ao “ponto de diamante”, o que significa que a pressão aplicada é concentrada na camada referente a 53% da largura do pneu (MCKEYS, 1985). O equipamento utilizado para aplicação de 440 kPa foi um pulverizador autopropelido com pneus de 31,5 cm, o qual aplica, portanto, a maior pressão na camada de 0,17 m, justificando a diferença de RP somente até a camada de 0,20 m. O trator utilizado

para aplicar os 220 kPa, apesar de menor pressão, possui pneus mais largos (frontal com 0,48 m e traseiro com 0,65 m), aplicando, portanto, a maior pressão entre 0,25 m e 0,35 m de profundidade, respectivamente, o que permitiu que entre as camadas de 0,20 m e 0,40 m esses tratamentos não diferissem entre si.

Os resultados mais expressivos são encontrados ao se comparar os valores de RP obtidos nos tratamentos plantio direto e escarificado, apresentados na Figura 21.



**Figura 21:** Resistência à penetração do solo nas áreas plantio direto, escarificado.

Entre os sistemas de preparo, em todas as camadas estudadas, o sistema plantio direto apresentou maiores valores de RP em relação ao sistema com escarificação. Apesar de constatar que no local a haste do escarificador atingiu no máximo a camada até 0,25 m, pode-se concluir que abaixo disso ocorreu também mobilização do solo pela diminuição da RP. Essa redução da RP abaixo da camada de 0,25 m, possivelmente ocorreu por fissuras criadas pela haste do escarificador, seguindo o ângulo de atrito interno do solo

O teor de água no solo, no momento da medida de RP, também foi semelhante entre os tratamentos, diferindo apenas entre o sistema plantio direto e escarificado na camada de 0,00 - 0,10 m (Tabela 7). Porém, os valores são bastante inferiores quando comparados aos da primeira medida de RP.

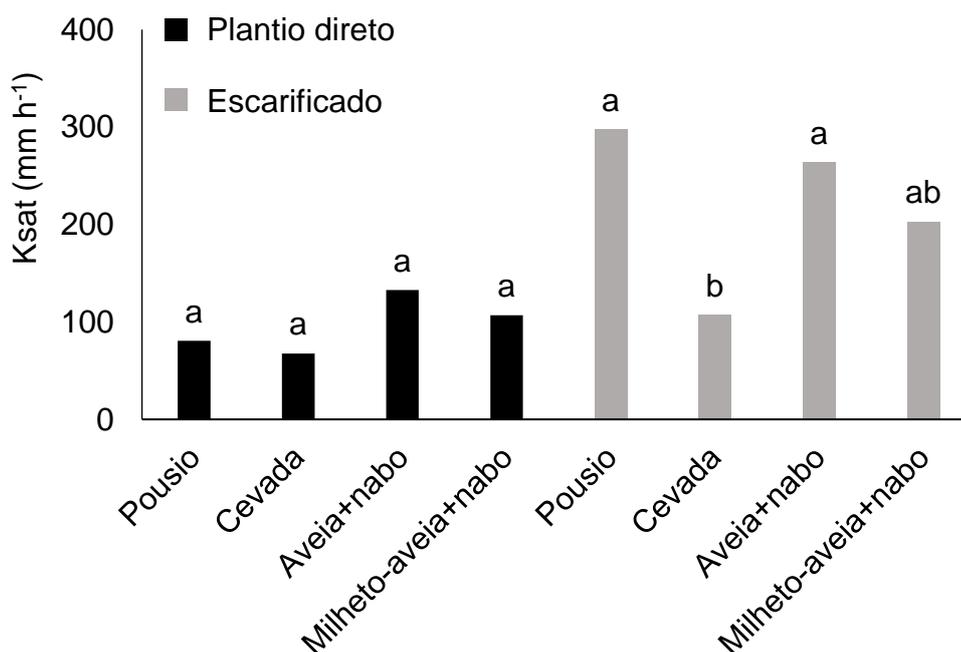
**Tabela 7:** Teor de água no solo (umidade gravimétrica) no momento da medida deresistência à penetração (RP) no mês de novembro de 2018.

Profundidade (m)	Sistema de preparo do solo	
	Plantio direto	Escarificado
	-----Umidade gravimétrica (g g <sup>-1</sup> ) -----	
0,00 - 0,10	0,311 a	0,299 b
0,10 - 0,20 <sup>ns</sup>	0,303	0,308
0,20 - 0,40 <sup>ns</sup>	0,321	0,322

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup>Não significativo

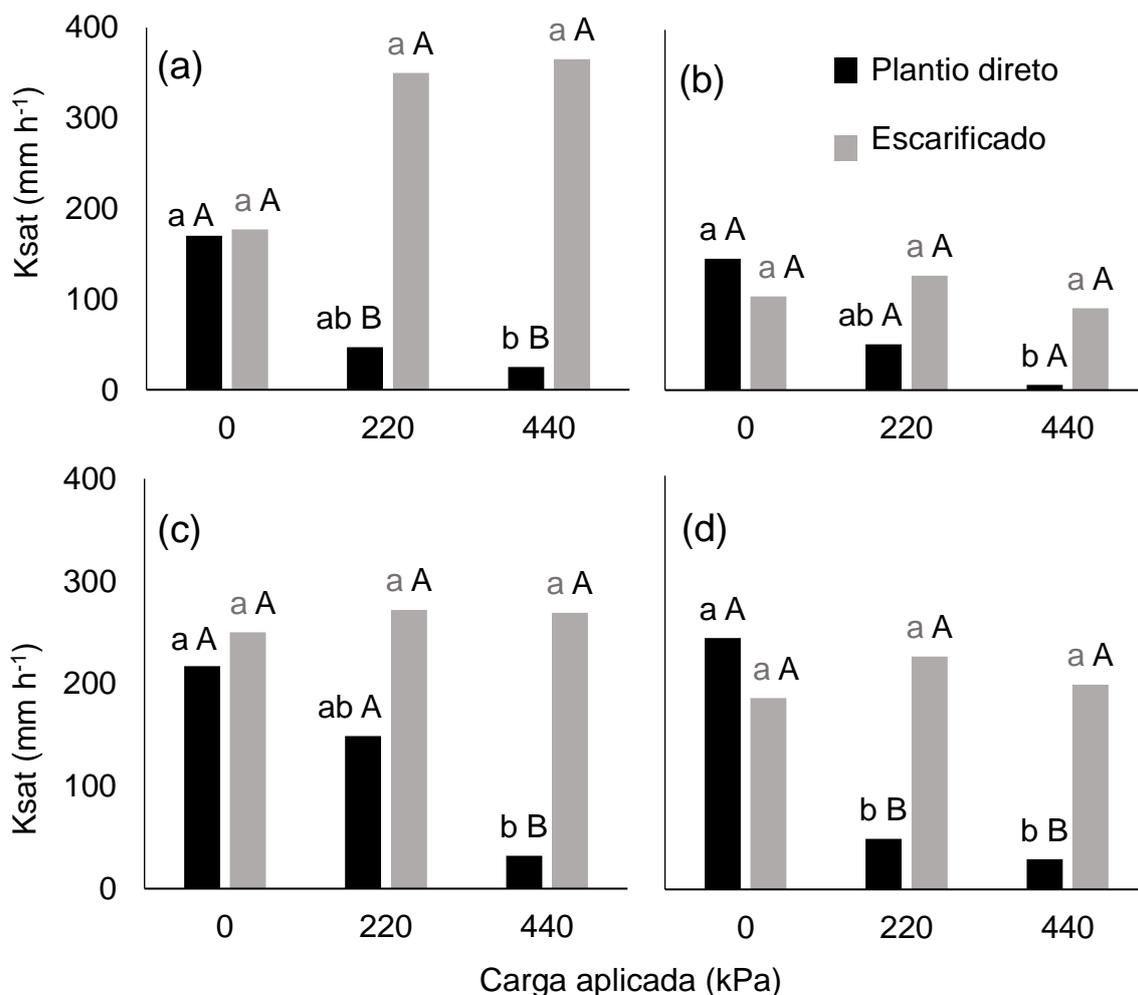
#### 6.1.2.5. Condutividade hidráulica do solo saturado *in situ*

Ao utilizar o método de Bagarello et al. (2004), passa-se de um anel com diâmetro de 5,6 cm (utilizado para essa determinação em laboratório) para um com diâmetro de 14,5 cm no campo, o que permite uma maior representatividade amostral, além de causar menos distúrbios na amostra, por não precisar levá-la ao laboratório. Após o ciclo das culturas de inverno, este foi o método utilizado para a determinação da K<sub>sat</sub>. Os resultados estão apresentados nas Figuras 22 e 23, tendo efeito de todos os fatores de variação estudados (níveis de compactação, sistemas de culturas e sistemas de preparo).



**Figura 22:** Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ) avaliada *in situ* em plantio direto e escarificado. Letras minúsculas fazem a comparação dentro de cada preparo do solo; de forma que letras iguais não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Dentre as culturas de inverno utilizadas, estas causaram alterações na  $K_{sat}$  apenas na área com escarificação, com menores valores nas áreas com cevada e com milheto/aveia+nabo. Porém, a última citada não difere dos demais tratamentos. Esse comportamento é explicado pela intensidade de tráfego em cada sistema, onde o sistema com cevada recebe uma colhedora para colheita de grãos, enquanto a área com milheto/aveia+nabo recebe duas vezes o tráfego do trator com semeadora. Além disso, o ensaio foi realizado logo após a colheita da cevada, e neste tratamento os poros ainda estavam sendo ocupados por raízes, causando uma redução também na  $K_{sat}$ .



**Figura 23:** Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) avaliada *in situ* no tratamento em pousio (a), cevada (b), aveia+nabo (c) e milheto-aveia+nabo (d). Letras minúsculas comparam as cargas dentro do mesmo sistema de preparo; letras maiúsculas comparam os sistemas de preparo dentro da mesma carga aplicada; letras iguais não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Em plantio direto a aplicação de cargas reduziu a Ksat em todos os sistemas de cultura utilizados. Porém, na área escarificada, as cargas não causaram diferenças. Vale destacar os valores obtidos no tratamento pousio, pois apesar de não significativa, a condutividade hidráulica no tratamento em que foi aplicado 440 kPa de pressão foi 50% maior, quando comparada a área com 0 kPa de pressão. Este fato inesperado foi explicado ao fazer uma análise visual dessas parcelas, onde foi constatado que a escarificação na área com 0 kPa causou maior pulverização do solo, enquanto na área com 440 kPa ocorreu

a quebra em grandes torrões, o que permite que a água encontre caminhos preferenciais no entorno desses torrões, aumentando assim a  $K_{sat}$ , como ilustrado na Figura 24

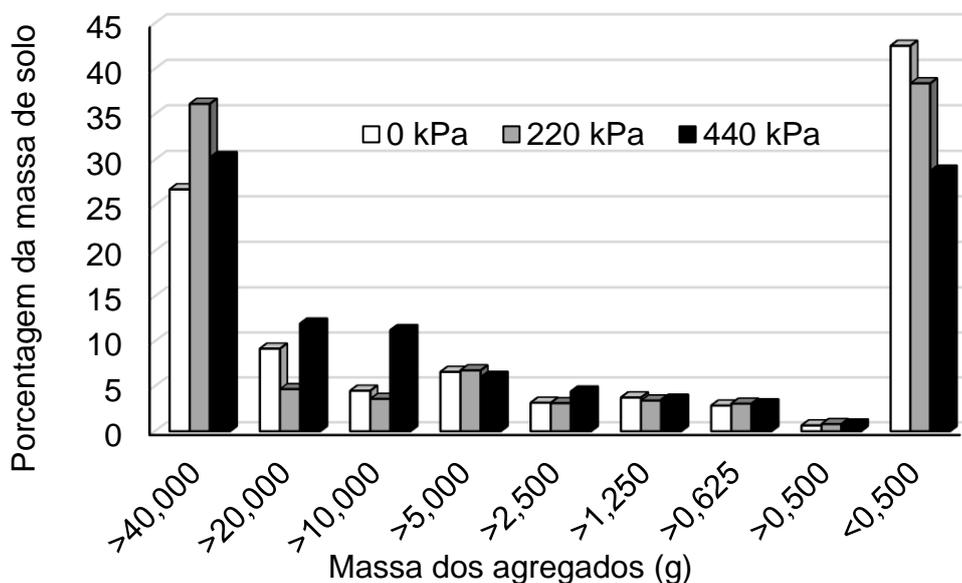


**Figura 24:** Agregados do solo presentes após a escarificação na área sem compactação ou 0 kPa (esquerda) e na área com maior nível de compactação ou 440 kPa (direita).

Além da análise visual, optou-se por coletar uma amostra de solo de aproximadamente dois quilos na camada de 0,00 - 0,20 m a fim de mensurar o tamanho dos agregados nas diferentes cargas aplicadas. Para este ensaio foram escolhidas as parcelas escarificadas que permaneceram em pousio durante o período de inverno (pois não sofreram influência do tráfego de máquinas, nem de raízes de plantas), nas três cargas aplicadas. Esse solo foi cuidadosamente secado em estufa a  $105^{\circ}$  durante 48 h. Os agregados foram separados manualmente e pesados de forma individual a fim de classificá-los em: maiores que 40 g; 20 a 40 g; 10 a 20 g; 5 a 10 g; 2,5 a 5 g; 1,250 a 2,5 g; 0,625 a 1,250 g; 0,5 a 0,625 g e menores que 0,5 g. Os resultados constam na Figura 25.

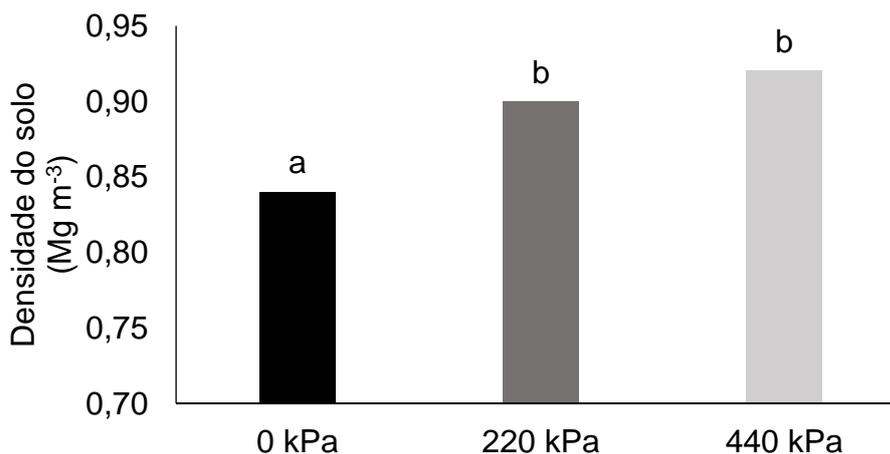
As classes que mostram maiores diferenças são as acima de 10 g e a classe de solo desagregado (menor que 0,5 g). Nos tratamentos com aplicação de cargas ocorreu maior porcentagem de agregados grandes, enquanto que o solo sem aplicação de cargas apresentou maior porcentagem de solo desagregado. Esse dado nos permite concluir que nas condições desse estudo, a escarificação promoveu maior pulverização do solo quando este não sofreu compactação antecedente, e essa maior pulverização justifica a menor infiltração

de água neste sistema.

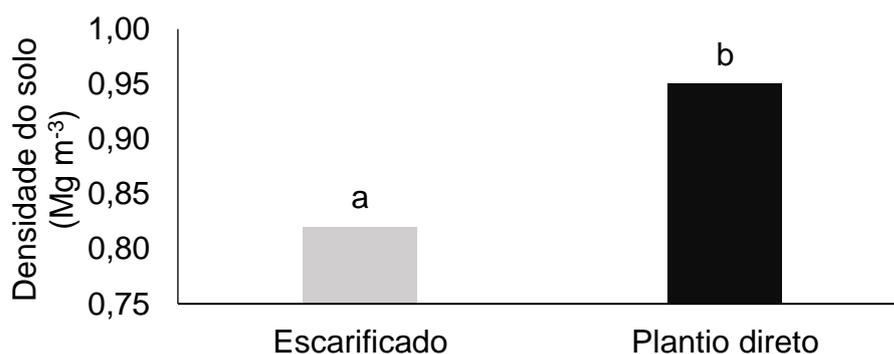


**Figura 25:** Massa dos agregados presentes em área em pousio após escarificação em solo que recebeu cargas de 0, 220 e 440 kPa.

No momento da determinação da condutividade hidráulica saturada pelo método de Bagarello et al., (2004), também foi necessária a avaliação da densidade na mesma camada. Os valores de densidade do solo em função da carga aplicada e do preparo do solo estão apresentados nas Figuras 26 e 27 respectivamente.



**Figura 26:** Densidade do solo para os diferentes níveis de compactação (0; 220 e 440 kPa), novembro de 2018. Barras seguidas da mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



**Figura 27:** Densidade do solo para os diferentes sistemas de preparo do solo, novembro de 2018. Barras seguidas de letras diferentes apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

As culturas utilizadas não causaram variação na densidade do solo. O maior valor de densidade foi encontrado na parcela em plantio direto com aplicação de 440 kPa, enquanto, o menor, na parcela escarificada sem aplicação de carga (0 kPa). Esses valores são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Densidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m no mês de novembro de 2018.

Nível de compactação (kPa)	Nível de compactação	
	Plantio direto	Escarificado
	-----Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> ) -----	
0	0,91	0,77
220	0,95	0,85
440	0,99	0,85

Estudos conduzidos nesta temática demonstram que a densidade do solo relativa ótima para o desenvolvimento de soja em Latossolos com teores de argila acima de 500 g kg<sup>-1</sup> é em torno de 85% (BEUTLER et al., 2005; SUZUKI et al., 2007), variando entre 61 e 79%. Portanto, verifica-se que a densidade do solo é baixa, mesmo na área mais compactada em plantio direto, onde a densidade relativa foi de 78%.

O que chama a atenção é que apesar de não significativo, os valores da densidade são maiores nas áreas compactadas, e isso não foi observado na

avaliação realizada logo após a aplicação das cargas. As cargas, portanto, de certa forma, fragilizaram a estrutura do solo, fazendo que com o passar do tempo, com ciclos de umedecimento e secagem, aumentasse a variação da densidade entre os níveis de compactação.

A umidade do solo variou entre as cargas e os preparos no momento do ensaio, conforme apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9:** Teor de água no solo na camada de 0,00 - 0,10 m nas diferentes cargas e preparos do solo no momento da realização do ensaio de condutividade hidráulica saturada.

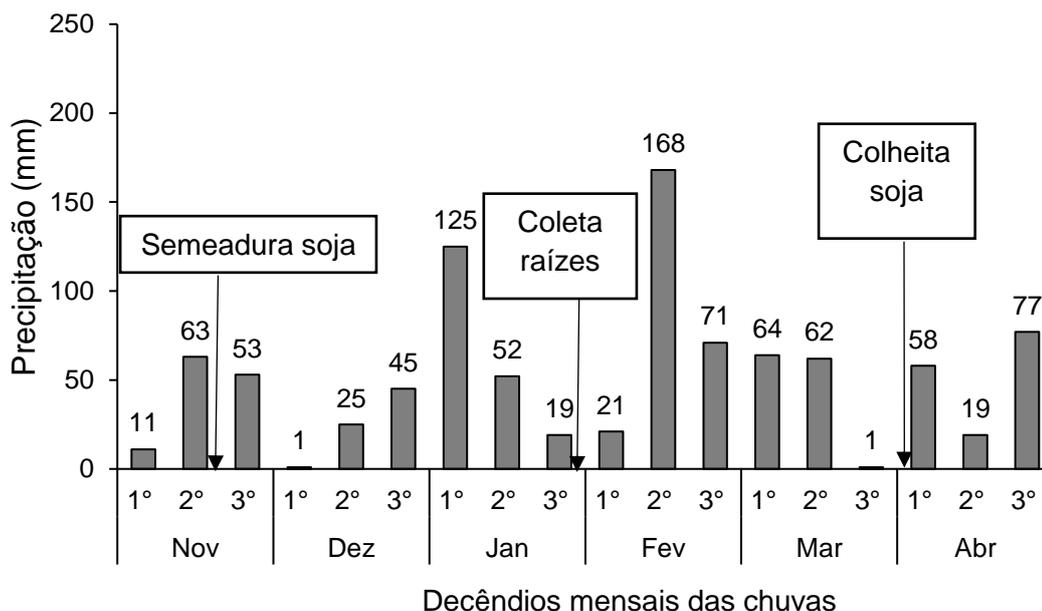
Tratamento		Umidade volumétrica (%)
Carga aplicada (kPa)	0	26 b
	220	28 a
	440	27 ab
Preparo do solo	Plantio direto	29 a
	Escarificado	25b

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Apesar de se tratar da camada superficial (0,00 - 0,10 m), percebe-se a importância do plantio direto na manutenção da umidade do solo. Em um hectare, a área com plantio direto possuía 400 litros de água a mais na camada de 0,00 - 0,10 m quando comparada a área escarificada, o que pode causar diferença à cultura em períodos de estiagem.

### 6.1.3. Análises realizadas durante o primeiro ciclo de soja

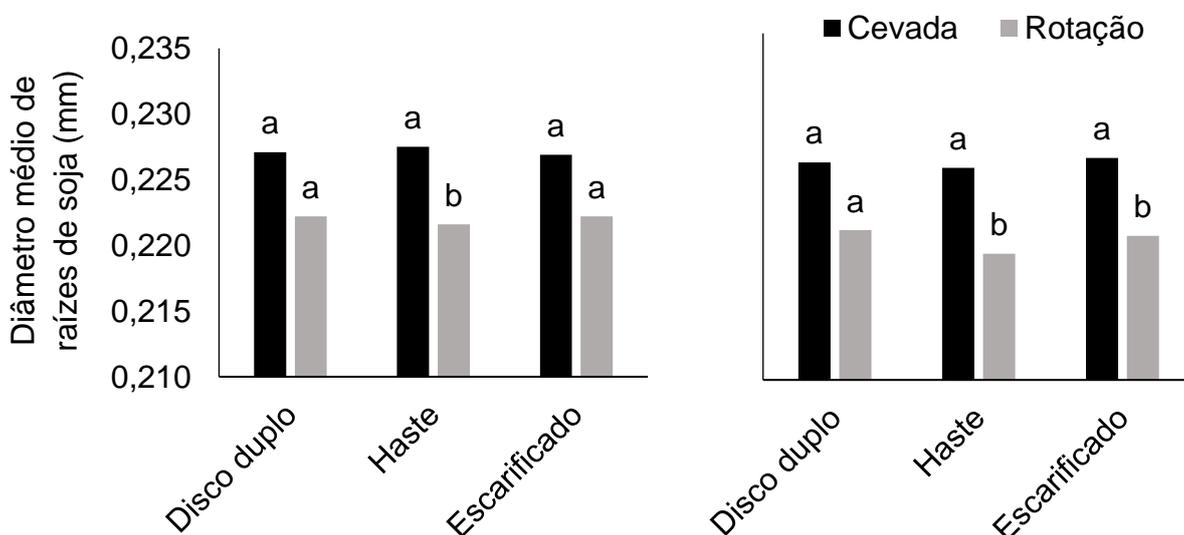
Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 22 de novembro de 2018 (data da semeadura da soja) até 04 de abril de 2019 (data da colheita da soja). Englobam, portanto, a coleta de raízes e a colheita da cultura da soja. A precipitação deste período está apresentada na Figura 28.



**Figura 28:** Decêndios mensais das chuvas entre os meses de novembro de 2018 e abril de 2019.

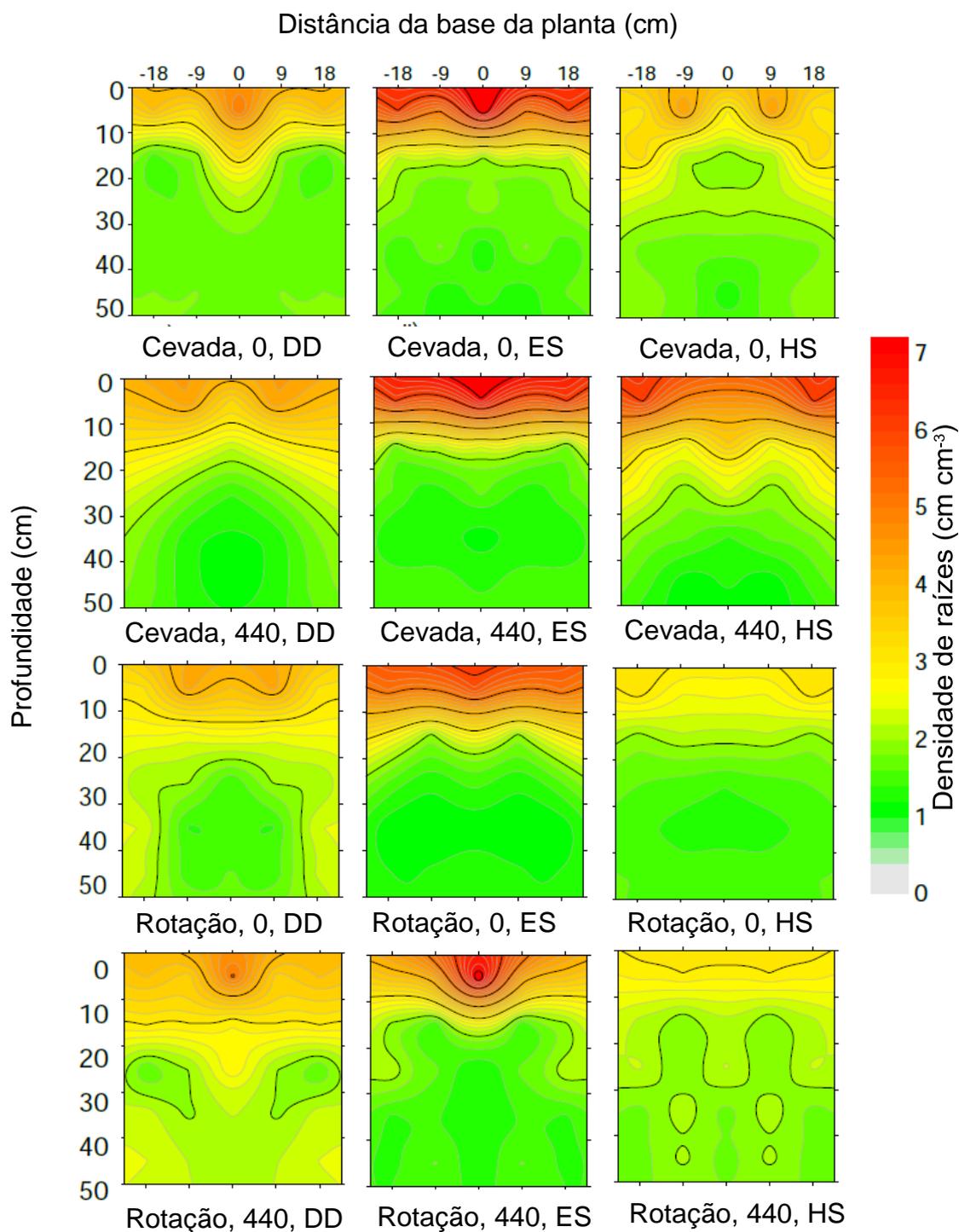
#### 6.1.3.1. Raízes de soja

Analisando todo o perfil de solo estudado, apenas o diâmetro das raízes foi afetado pelos tratamentos (Figura 29), portanto foram realizadas análises entre as diferentes profundidades.



**Figura 29:** Diâmetro médio das raízes de soja submetidas a diferentes sistemas de preparo, culturas antecessoras e níveis de compactação (a: 0 kPa e b: 440 kPa). As letras nas barras de médias fazem a comparação entre os sistemas de cultura dentro de cada prática mecânica, letras iguais significam que não há diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

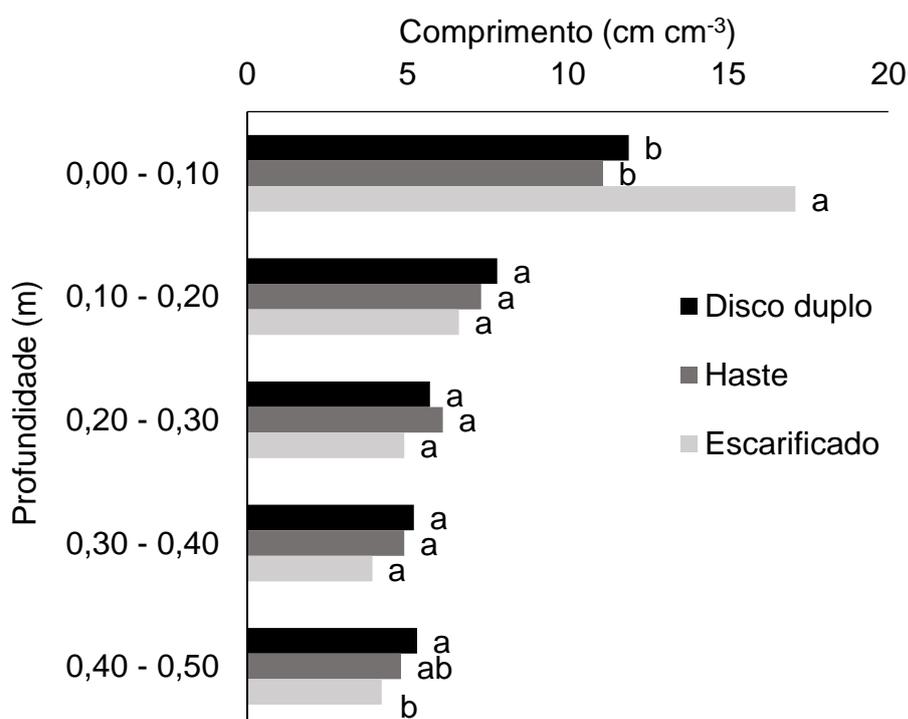
Para uma análise visual dos resultados, facilitando sua interpretação, foram construídos gráficos de isolinhas com a distribuição das raízes de soja no perfil de solo em cm de raízes por  $\text{cm}^3$  de solo (Figura 30).



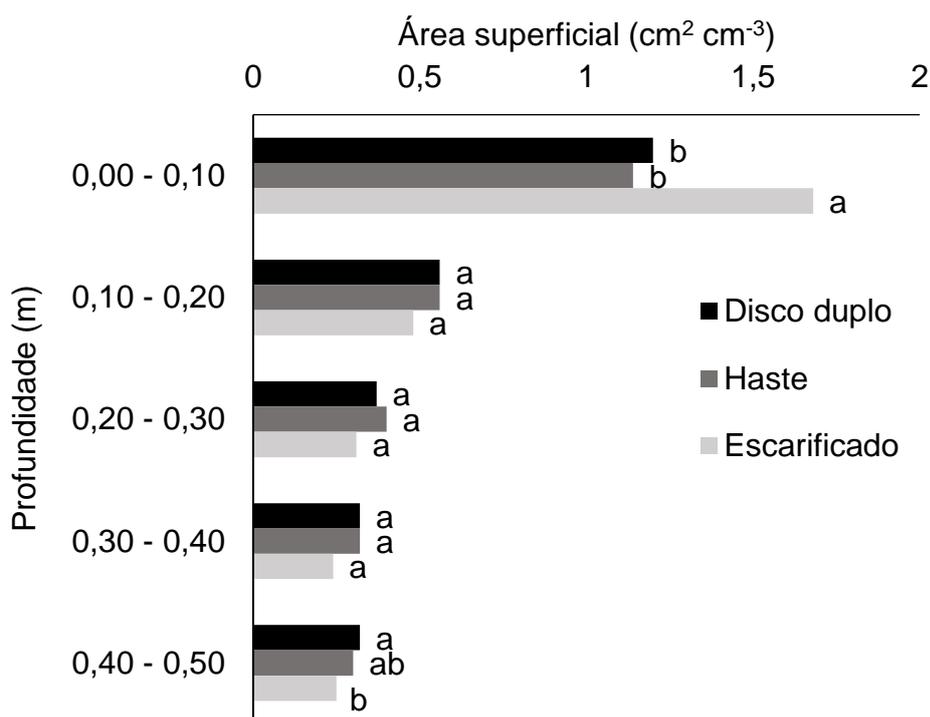
**Figura 30:** Densidade de raízes de soja no perfil de solo nos tratamentos estudados. Legenda: Cevada e Rotação (milheto/aveia+nabo) foram as culturas antecedentes; 0 e 440 são os níveis de compactação baixo e alto e DD, ES e HS são, respectivamente, as práticas mecânicas, disco duplo, escarificação e haste sulcadora.

O principal resultado que pode ser observado visualmente nos gráficos gerados pelo software Surfer é que o uso de escarificação aumentou a concentração de raízes em superfície, o que pode causar problemas em anos com estresse hídrico, visto que a planta aprofundará menos o sistema radicular em busca de água. Também, como já apresentado anteriormente, a área escarificada apresentou menor umidade na camada de 0,00 - 0,10 m, quando comparada a de plantio direto. Entre o uso de haste e do disco duplo, a distribuição de raízes não seguiu um padrão, não sendo beneficiado, portanto, por nenhum dos sistemas. Dentre a área com e sem compactação, a área compactada proporcionou às plantas maior desenvolvimento de raízes.

Os sistemas de preparo causaram ainda diferenças no comprimento e na área superficial das raízes (Figuras 31 e 32).



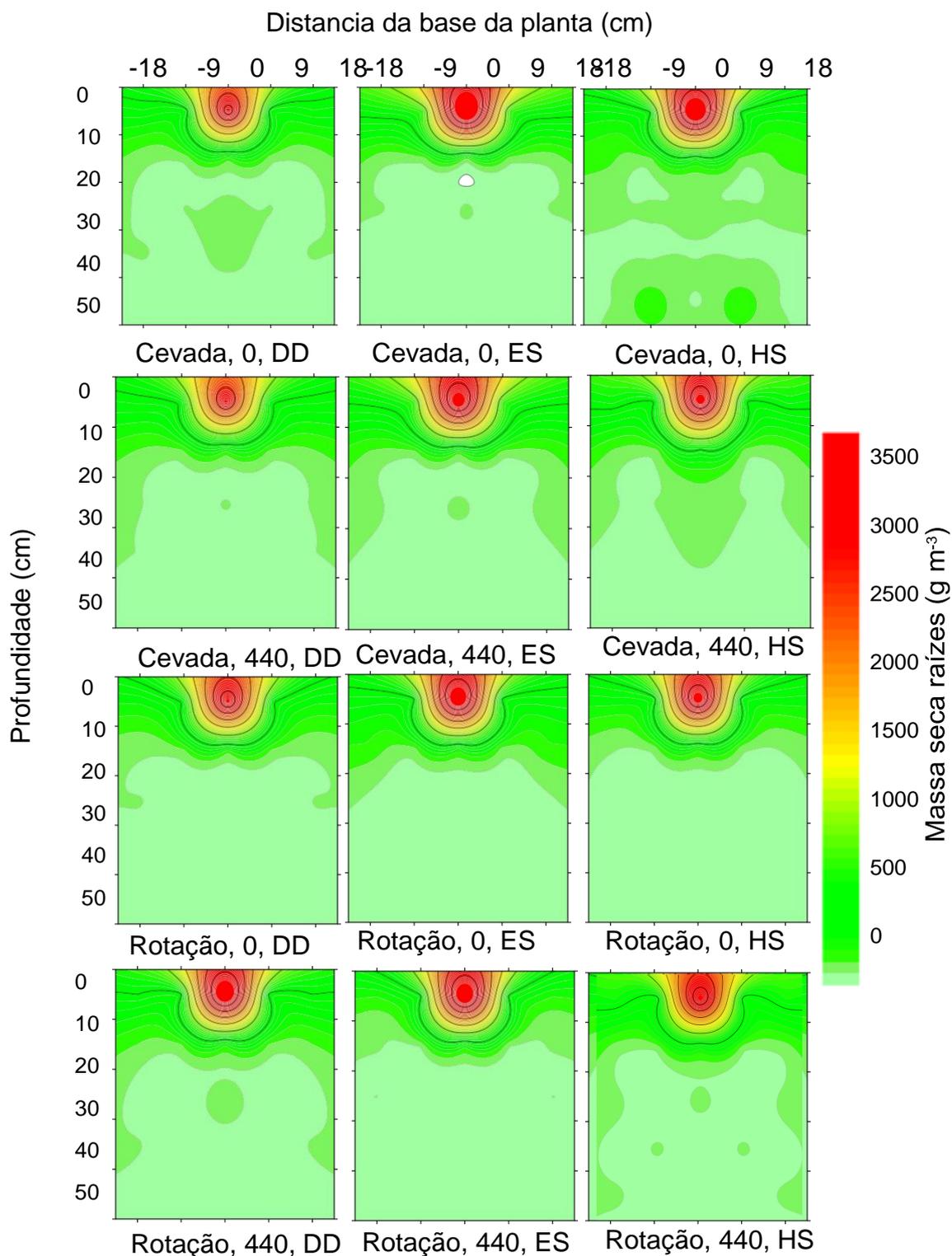
**Figura 31:** Comprimento de raízes de soja em diferentes profundidades e sistema de preparo utilizado. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



**Figura 32:** Área superficial de raízes de soja em diferentes profundidades e sistema de preparo utilizado. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A área superficial das raízes seguiu o mesmo comportamento que o comprimento das raízes, com o sistema escarificado apresentando maiores valores na camada de 0,00 - 0,10 m e menores na camada de 0,40 - 0,50 m. Ainda na camada de 0,40 - 0,50 m, percebe-se que a área cultivada com haste sulcadora, apresentou valores menores quando comparado ao disco duplo e maiores quando comparado ao escarificado. No entanto não diferindo significativamente de nenhum dos tratamentos. Este fato pode ser explicado devido ao fato de que na camada de 0,20 - 0,30 m ocorreu um pequeno incremento (não significativo estatisticamente) no comprimento e na área superficial das raízes do tratamento com haste sulcadora. Isto é coerente pois essa é a profundidade que fica imediatamente após a de ação da haste sulcadora.

Apesar das diferenças apresentadas na área superficial e no comprimento das raízes, a massa seca de raízes foi semelhante entre os tratamentos. Esses resultados estão apresentados na Figura 33.



**Figura 33:** Distribuição da massa seca de raízes de soja no perfil de solo nos tratamentos estudados. Legenda: Cevada e Rotação (milheto + nabo) foram as culturas antecedentes; 0 e 440 são os níveis de compactação baixo e alto e DD, ES e HS são as práticas mecânicas, disco duplo, escarificação e haste sulcadora respectivamente.

Com relação à massa seca de raízes, as diferenças não foram muito evidentes. No entanto, é possível visualizar que, de forma geral, o tratamento haste sulcadora apresentou melhor distribuição da massa das raízes em profundidade, com exceção da área sem compactação em rotação com aveia+nabo.

#### 6.1.3.2. Rendimento da soja

Como na cevada verificou-se efeito do tráfego sobre a área escarificada, a colheita da soja também foi realizada de forma a separar a parte escarificada sem tráfego da parte escarificada com tráfego. Foi determinado o peso de mil sementes de soja, cujos valores constam na Tabela 10.

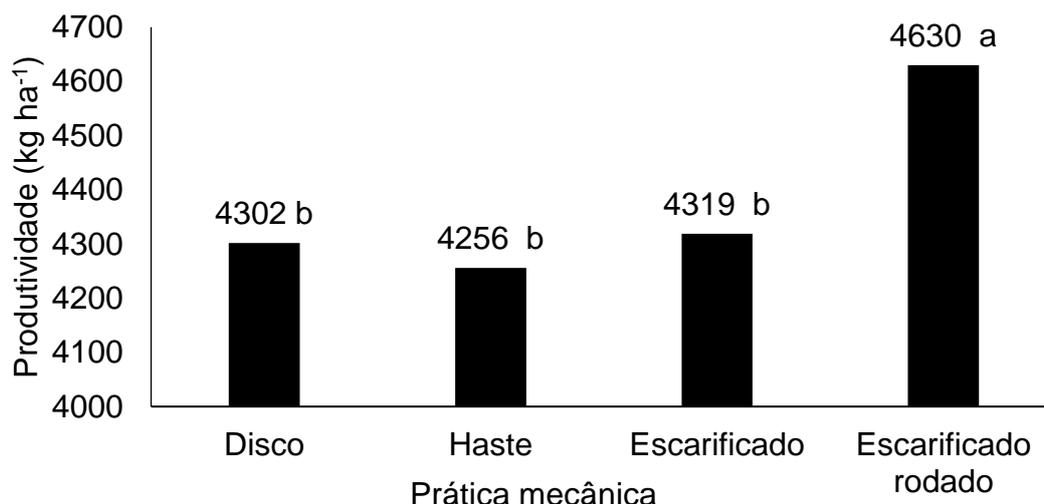
**Tabela 10:** Peso de mil sementes de soja em função do sistema de culturas e das práticas mecânicas aplicados na safra de 2018/2019.

Cultura anterior	Prática mecânica			
	Disco	Haste	Escarificado	Esc. rodado
-----Peso de mil sementes de soja (g)-----				
Pousio	206 aA	200 a AB	193 bB	197 bB
Cevada	203 aA	202 aA	209 aA	204 abA
Aveia+nabo	201 aA	203 aA	203 abA	204 abA
Milheto/aveia+nabo	205 aA	206 aA	200 abA	206 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula (na coluna) e maiúscula (na linha) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

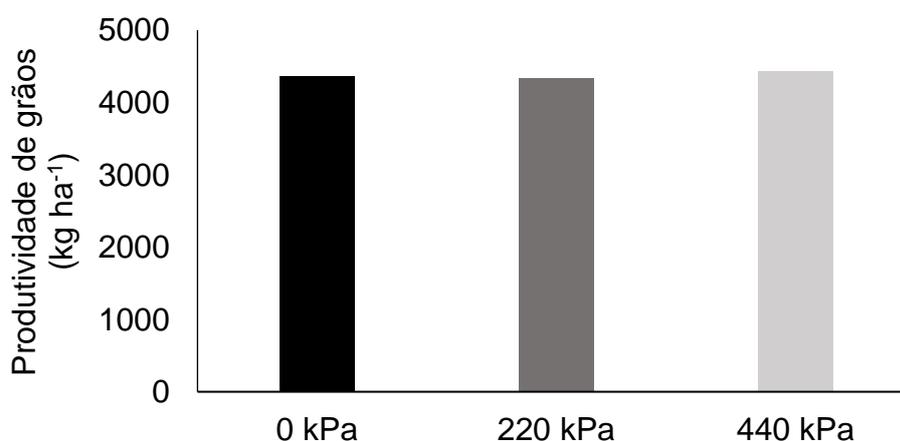
De forma geral, a interação entre pousio e escarificação diminuiu o peso de mil sementes de soja. Isso pode acontecer devido à degradação causada por esse sistema, onde o solo fica exposto, facilitando assim a decomposição de matéria orgânica e aumentando a lixiviação de nutrientes.

Na produtividade de grãos da soja, apenas a prática mecânica exerceu efeito significativo na produtividade (Figura 34), seguindo o mesmo comportamento apresentado pela cevada, onde a área escarificada com tráfego apresentou o maior valor de produtividade de grãos.



**Figura 34:** Produtividade de soja em função dos tratamentos de práticas mecânicas, safra 2018/2019. \*Médias seguidas de letras diferentes apresentaram diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

As cargas não alteraram a produtividade de soja. Isso pode ter ocorrido pela alta resiliência do solo à compactação ou até mesmo por não ter ocorrido déficit hídrico neste ano, ocorrendo apenas 2 decêndios sem chuva durante o ciclo da cultura. Não ocorrendo déficit hídrico, o solo permanece úmido e, conseqüentemente, apresenta baixa resistência ao desenvolvimento das raízes, o que permitiu que as mesmas se desenvolvessem normalmente, mesmo na área mais compactada (440 kPa). Os valores de produtividade da soja nestes tratamentos estão apresentados na Figura 35.

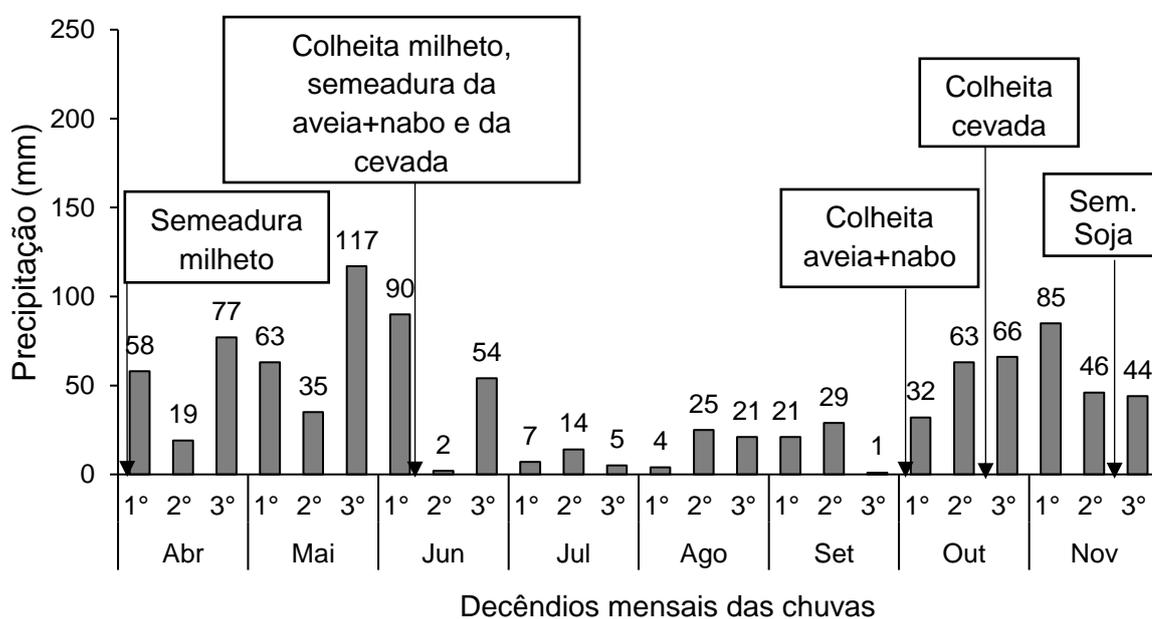


**Figura 35:** Produtividade de soja em função da carga aplicada na safra de 2018/2019.

Os dados obtidos neste estudo corroboram com os obtidos por Secco et al. (2004), trabalhando com níveis de compactação em Latossolo sob plantio direto, onde a cultura da soja apresentou comportamento semelhante para os diferentes estados de compactação do solo. Os mesmos autores também perceberam que a escarificação não propiciou incremento na produtividade. Nem mesmo a compactação induzida causou redução na produtividade e, desta forma, sendo desnecessária a mobilização do solo com escarificação.

6.1.4. Análises realizadas durante e após o segundo ciclo de culturas de outono/inverno

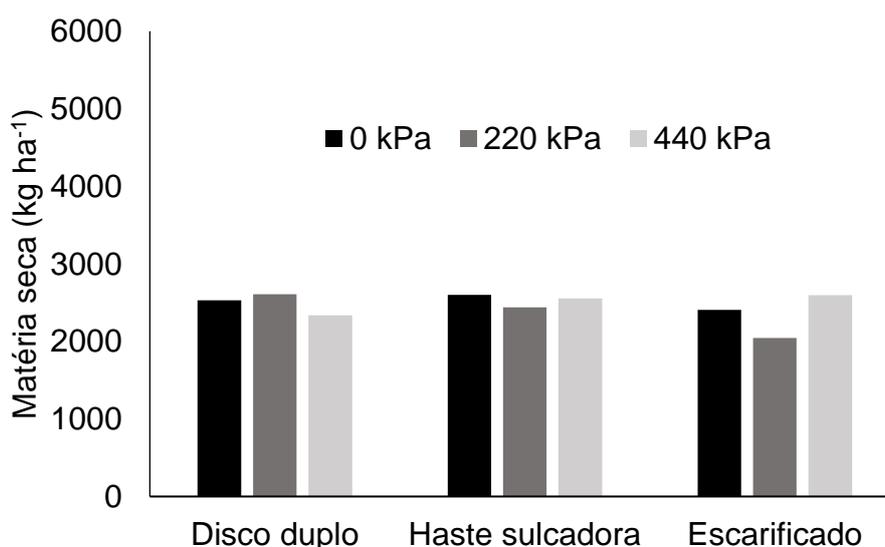
Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 04 de abril de 2019 (data da colheita da soja e semeadura do milho) até 22 de novembro de 2019 (data da semeadura da soja). Englobam, portanto, a semeadura e colheita do milho, semeadura e colheita da aveia+nabo, semeadura e colheita da cevada, bem como as análises do solo de condutividade hidráulica saturada *in situ* e de resistência à penetração do solo. Os dados de precipitação, ocorrida neste período, estão apresentados na Figura 36.



**Figura 36:** Decêndios mensais das chuvas entre os meses de abril de 2019 e novembro de 2019.

#### 6.1.4.1. Produtividade de biomassa de milho

A produtividade de biomassa de milho nesta safra foi menor quando comparada ao ano anterior, principalmente devido as menores temperaturas (média de 17°C, média mínima de 13 °C, e média máxima de 23 °C), e a alta precipitação no período (458 mm), sendo esta duas vezes superior quando comparada a precipitação na safra anterior, o que possivelmente proporcionou menos horas luz dia, diminuindo a capacidade fotossintética da cultura. Nesta safra, já se teve o efeito residual de mais uma prática mecânica: da haste sulcadora que foi utilizada na semeadura da soja no verão. Porém, nenhum tratamento causou efeito na produtividade do milho (Figura 37), o que permite, novamente inferir que este solo apresenta alta resiliência, ou seja, ele retorna rapidamente a sua condição original após a aplicação de uma carga, o que motivou a incluir esta análise no trabalho.

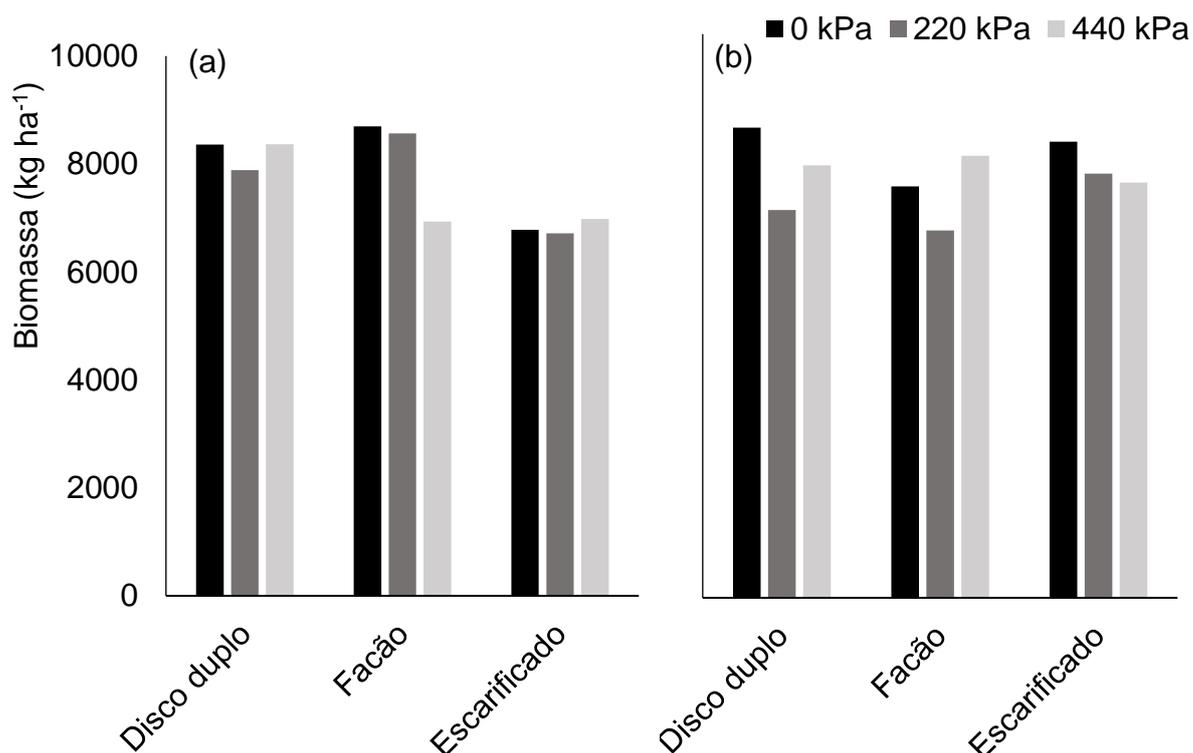


**Figura 37:** Produção de biomassa milho em função do sistema de manejo aplicado e das cargas aplicadas na safra de 2019.

Além da resiliência do solo, o próprio milho, o nabo com aveia e a soja utilizados anteriormente na área, podem ter ajudado na melhoria estrutural do solo durante o ano, permitindo o pleno desenvolvimento da cultura em todos os tratamentos.

#### 6.1.4.2. Produção de biomassa de aveia+nabo

Nesta safra, nem as cargas aplicadas, nem mesmo os sistemas de manejo causaram diferenças na produtividade de biomassa de aveia+nabo (Figura 38).



**Figura 38:** Produtividade de biomassa de aveia+nabo em função do sistema de manejo e das cargas aplicadas na safra de 2019. (a): pousio como cultura antecessora, (b) milho como cultura antecessora.

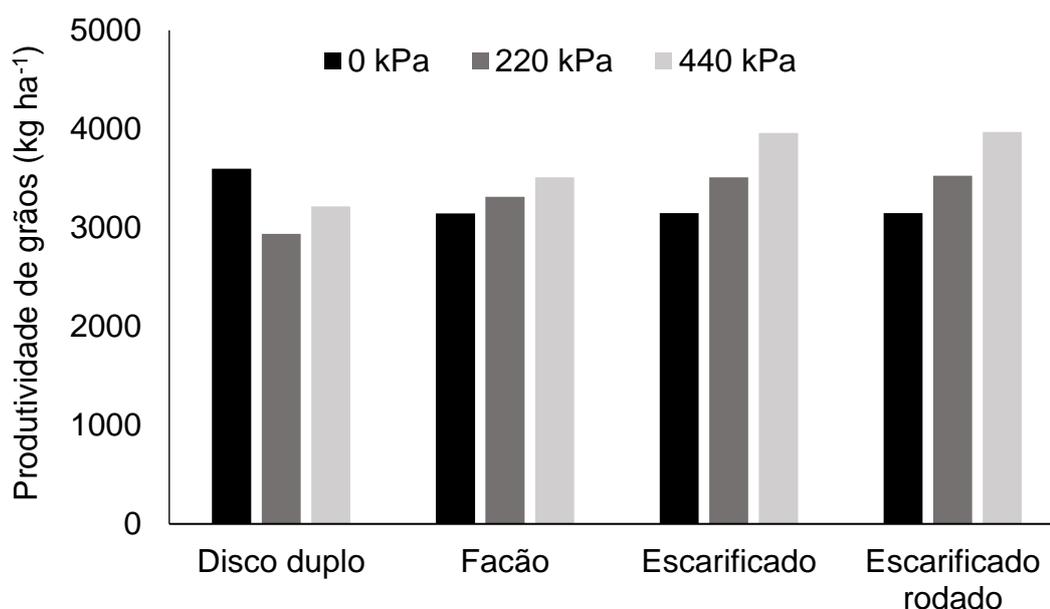
Os dados de produtividade de biomassa de aveia+nabo no ano de 2019, mais uma vez mostram a alta resiliência deste solo, sendo capaz de manter alta produção de biomassa, mesmo nas áreas mais compactadas.

Cabe salientar a alta produtividade de biomassa produzida (em torno de 8 t ha<sup>-1</sup>), quantidade muito próxima ao mínimo necessário para a manutenção dos estoques de carbono em clima tropical que é de aproximadamente 9 t ha<sup>-1</sup> (BAYER et al., 2006). Isso permitiria a sustentabilidade do sistema até mesmo

em preparo convencional, pois ainda se tem no ano, a adição da biomassa da cultura de verão, que, no caso da soja, ficou em torno de 4 t ha<sup>-1</sup>.

#### 6.1.4.3. Produtividade de cevada

Na segunda safra de cevada, nenhum fator causou diferenças na produtividade de cevada (Figura 39).



**Figura 39:** Produtividade de cevada em função do sistema de manejo aplicado na safra de 2019.

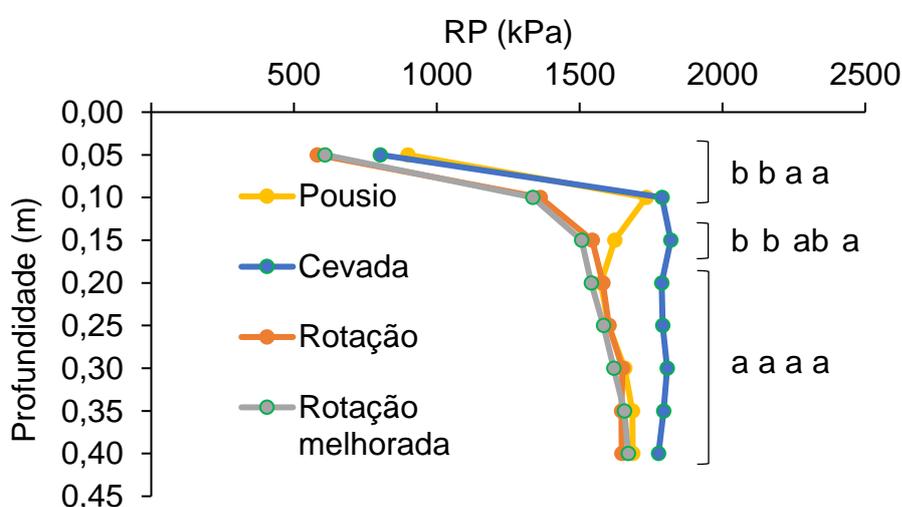
Apesar de nenhuma diferença significativa, pode ser observado que na área com menor mobilização do solo (disco duplo), a produtividade da cevada tendeu a decrescer com a aplicação das cargas. Neste caso, as cargas podem ter afetado o desenvolvimento radicular da cultura, consequentemente diminuindo um pouco sua produtividade.

Ao utilizar alguma prática mecânica de mitigação (haste sulcadora e escarificação), a produtividade é incrementada conforme o aumento da carga aplicada. Através do gráfico de distribuição das chuvas apresentado acima (Figura 36), durante o ciclo da cevada o acumulado precipitado foi baixo em relação as outras épocas. Conforme já apresentado, as áreas mais compactadas são capazes de reter mais água, o que permitiu maior suprimento para as plantas. Portanto, as áreas manejadas com algum elemento mecânico de descompactação permitiram melhor desenvolvimento das raízes, que aliado a

maior retenção de água no solo, causou maior produtividade de grãos de cevada. Isso corrobora com Stirzaker et al. (1996), onde relatam que maiores conteúdos de água aumentam a tolerância das plantas à compactação, além do que as gramíneas, por terem raízes mais finas, serem menos prejudicadas pela compactação.

#### 6.1.4.4. Resistência à penetração do solo (RP)

Apesar da produtividade semelhante das culturas entre nos ciclos anteriores, a RP mostra que todos os tratamentos estudados causaram variação nos valores desta, conforme apresentado nas Figuras 40, 41 e 42.



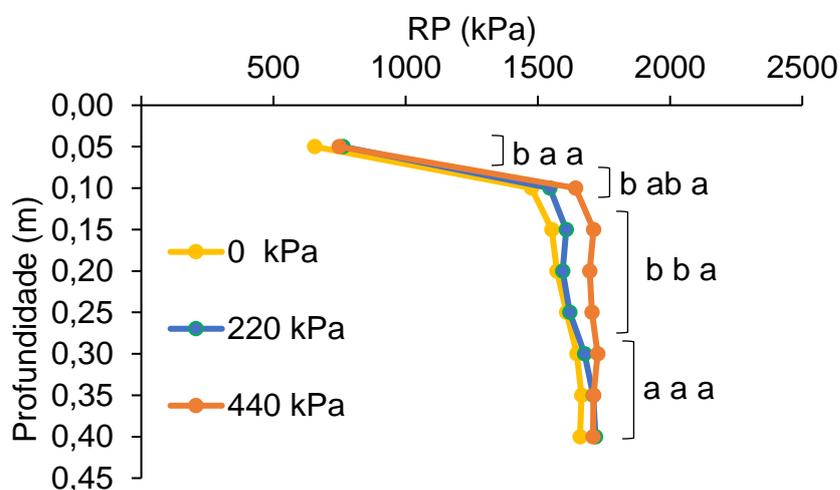
**Figura 40:** Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de cultura. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas de cultura, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

A área com cevada, pelo tráfego da colhedora, continua apresentando os maiores valores de RP, no entanto sendo significativo apenas até a camada de 0,20 m. O aumento da RP na parcela com pousio (dois invernos em pousio) já é mais evidente, mas não difere significativamente da parcela com cevada. No entanto, até a camada de 0,10 m, este difere dos tratamentos rotação (aveia+nabo) e rotação melhorada (milheto/ aveia+nabo). Na camada de 0,15 m, o pousio apresentou valores intermediários entre os obtidos nas áreas de rotação e rotação melhorada com os obtidos na área com cevada. Tal fato evidencia a

importância da proteção que a cobertura oferece ao solo, pois esse aumento está ligado diretamente ao selamento do solo causado pelo impacto da gota de chuva (ROSA et al., 2013). Além disso, possivelmente o carbono orgânico na área em pousio esteja decrescendo quando comparado as áreas cultivadas, o que também pode causar aumento nos valores de RP por diminuir a agregação nessas áreas (BEUTLER et al., 2001).

Prado et al., (2002), em estudo num Latossolo, concluíram que a RP aumentou quando o solo foi submetido a um longo período de pousio, que no caso foi de 5 anos, independentemente do sistema de preparo anteriormente utilizado. No entanto, no presente estudo este efeito já é observado num curto período de tempo, visto que o pousio durou apenas oito meses (março a novembro de 2018). Posteriormente foi realizada a semeadura da soja, que permaneceu na área por cinco meses (novembro de 2018 a abril de 2019) e depois ficou novamente em pousio por sete meses (abril a novembro de 2019).

Ao se comparar os diferentes níveis de compactação, as diferenças de RP ocorreram somente até a camada de 0,25 m (Figura 41).

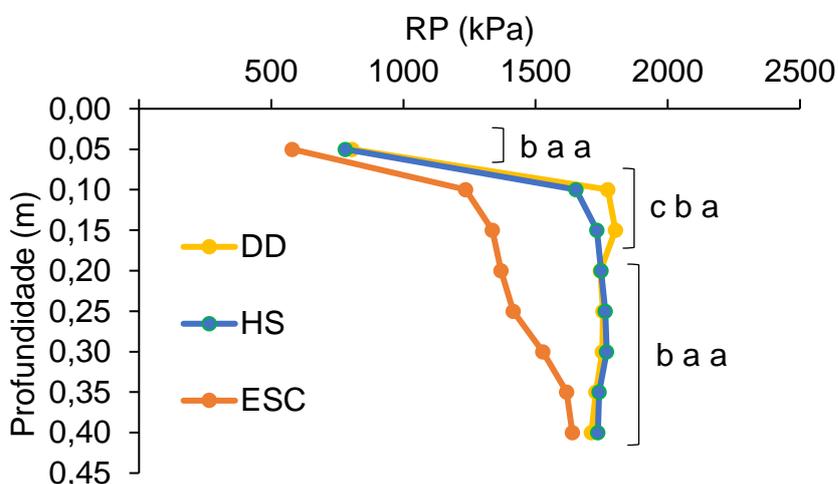


**Figura 41:** Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes níveis de compactação. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os níveis de compactação estudados, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

Na camada de 0,00 - 0,05 m, a área sem compactação apresentou o menor valor de RP. Os níveis de compactação intermediário e elevado apresentaram os maiores valores, porém não diferindo entre si. Já na camada de 0,05 – 0,10 m, a área sem compactação apresentou o menor valor de RP, a área com nível elevado de compactação a maior, enquanto o nível médio apresentou valor intermediário. Entre as camadas de 0,15 m e 0,25 m, a área com o nível elevado de compactação apresentou o maior valor de RP, mas não diferindo dos demais. Nas camadas posteriores os tratamentos não apresentaram diferenças de RP.

As diferenças entre os níveis de compactação já não são mais tão evidentes quanto aos observados 12 meses antes, pois as culturas, bem como a própria resiliência do solo, vêm trabalhando de forma semelhante nos tratamentos, causando este efeito. A área com nível intermediário de compactação já é muito semelhante a área sem compactação, pois diferiram apenas na camada de 0,00 - 0,05 m.

Os sistemas de preparo causaram variações da RP em todas as camadas de solo estudadas (Figura 42).



**Figura 42:** Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes preparos do solo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas preparo estudados, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

A área escarificada apresenta os menores valores de RP em todas camadas avaliadas, no entanto já é menos expressiva da verificada há 12 meses. Vale destacar que ao se utilizar a haste sulcadora em apenas uma safra, já ocorrem reduções significativas nos valores de RP entre as camadas de 0,05 - 0,15 m. Cabe salientar que o espaçamento da sementeira da soja foi de 45 cm entre linhas, portanto, a mobilização do solo pela haste sulcadora ocorreu apenas nestas linhas. Se esta prática for sendo utilizada consecutivamente, os resultados podem ser ainda mais expressivos. Drescher et al. (2012), em um Latossolo Vermelho também verificaram redução na RP na camada de 0,07 - 0,15 m com o uso da haste sulcadora após 9 safras.

Assim, o emprego de haste sulcadora é uma alternativa para descompactação superficial do solo, pois mobiliza o mesmo no local específico de maior desenvolvimento das raízes (SILVA, 2003), além de exigir menos energia, quando comparada ao escarificador. Enquanto o uso do escarificador mobilizou em torno de  $1.750 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1}$ , a haste atuando até 0,19 m mobilizou apenas  $235 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1}$ , enquanto o disco duplo mobilizou  $135 \text{ m}^{-3} \text{ ha}^{-1}$  (valores medidos no experimento). Logo, além da menor exigência de energia, o uso da haste sulcadora não compromete a estrutura do solo em todo perfil, sem o expor aos agentes climáticos e possíveis perdas por erosão e, ao mesmo tempo, permitindo redução da compactação na área de predominância das raízes.

Cunha et al. (2015), verificaram que a eficiência energética do plantio direto em um Latossolo vermelho é de quase 25% superior quando comparada ao sistema escarificado. Portanto, não ocorrendo incrementos de produtividade, a sustentabilidade da área escarificada é questionável.

#### 6.1.4.5. Condutividade hidráulica do solo saturado *in situ*

Os resultados de condutividade hidráulica neste ano apresentaram apenas interações duplas. Os resultados na interação entre as cargas aplicadas e os sistemas de cultura estão apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11:** Condutividade hidráulica saturada *in situ* na interação entre sistemas de cultura e níveis de compactação.

Cultura anterior	Carga aplicada (kPa)		
	0	220	440
	Condutividade hidráulica saturada (mm h <sup>-1</sup> )		
Pousio	177 abB	144 abB	256 aA
Cevada	144 bA	108 bA	132 bA
Aveia+nabo	244 aA	223 aA	213 abA
Milheto/aveia+nabo	234 aA	153 abB	265 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula (na coluna) e maiúscula (na linha) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Os principais resultados observados nesta interação é que a área com cevada apresentou os menores valores de Ksat em todos níveis de compactação estudados. Conforme já relatado anteriormente, esta área sofre tráfego mais acentuado, devido à colhedora de parcelas, causando compactação adicional ao solo. A área em pousio, com cargas de 0 e 220 kPa, apresentou valores intermediários de Ksat, devido ao selamento superficial do solo causado pelo impacto das gotas de chuva. No entanto, este comportamento não foi verificado na área que recebeu carga de 440 kPa. Isso porque nessas parcelas percebeu-se que o caráter retrátil do solo fez com que ocorresse maior quantidade de fendilamentos, permitindo, portanto, maior infiltração de água nessas fissuras.

Os valores de Ksat da interação entre as práticas mecânicas e as cargas aplicadas estão apresentados na Tabela 12.

Nesta interação, a única diferença ocorreu na área sem compactação, onde a Ksat aumentou com o aumento da mobilização do solo. Nas áreas compactadas, apesar de apresentar o mesmo comportamento, as diferenças não foram significativas, já se perdendo, portanto, boa parte do efeito da escarificação 20 meses após a execução da mesma. Drescher et al. (2011), em um Latossolo Vermelho ( $\cong 0,50 \text{ g kg}^{-1}$  de argila), encontraram resultados

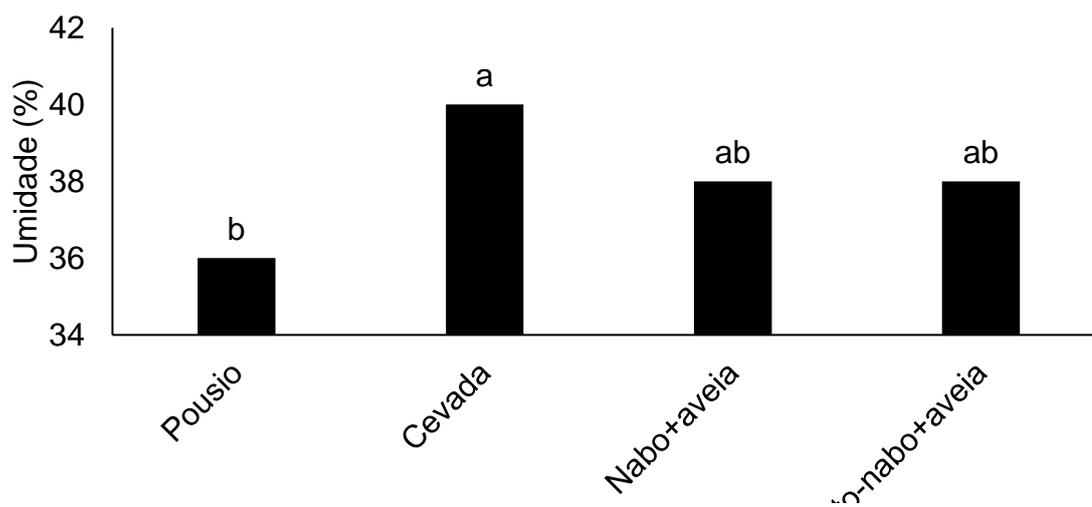
similares, verificando que 24 meses após a escarificação, seus efeitos não eram mais expressivos.

**Tabela 12:** Condutividade hidráulica saturada *in situ* na interação entre sistemas de preparo e níveis de compactação.

Carga aplicada (kPa)	Prática mecânica		
	Disco duplo	Haste sulcadora	Escarificado
0	169 aB	187 aAB	244 aA
220	126 aA	153 aA	192 aA
440	187 aA	209 aA	254 aA

Médias seguidas da mesma letra minúscula (na coluna) e maiúscula (na linha) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

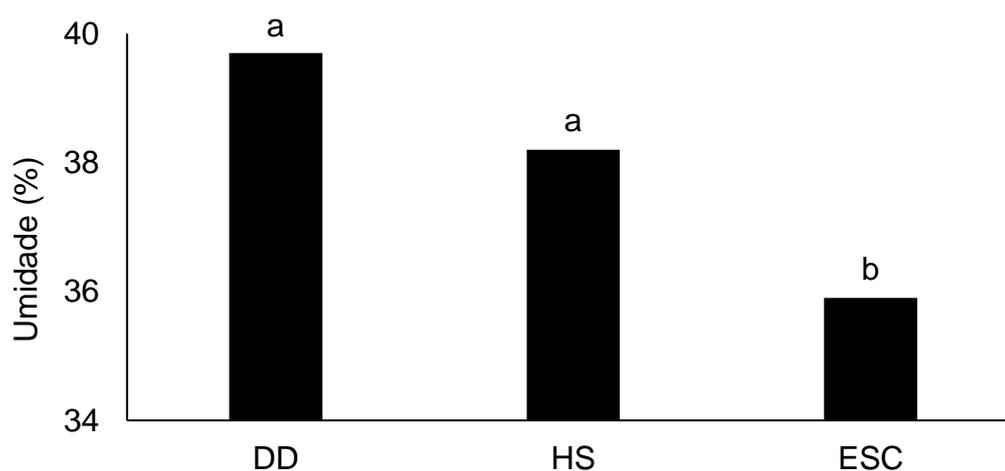
Apesar das poucas diferenças ocorridas na  $K_{sat}$ , os valores dos teores de água e de densidade do solo (que são necessários para o cálculo da  $K_{sat}$ ) apresentaram maiores variações. O teor de água no solo variou com os sistemas de culturas (Figura 43) e com os sistemas de preparo (Figura 44), enquanto a densidade do solo variou com as cargas aplicadas (Figura 45) e com os sistemas de preparo (Figura 46).



**Figura 43:** Teor de água no solo nos diferentes sistemas de cultura no momento da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A área em pousio apresentou o menor teor de água do solo, a área com cevada o maior e as áreas com aveia+nabo valores intermediários. Esse fato está relacionado principalmente com a exposição da superfície do solo, onde a área em pousio é a mais exposta, enquanto as demais têm a proteção conferida pela palhada. No entanto o consórcio aveia+nabo foi manejado cerca de duas semanas antes da colheita da cevada, justificando o maior teor de água na área com cevada. Comportamento semelhante já foi observado por Campos et al. (1994), onde a área cultivada com aveia apresentou maior valor de umidade durante todo o ciclo, enquanto a área em pousio, o menor.

Já entre os sistemas de preparo (Figura 44), o teor de água diminuiu com o aumento da mobilização do solo, no entanto diferindo apenas na área escarificada, a qual apresentou o menor valor de umidade.

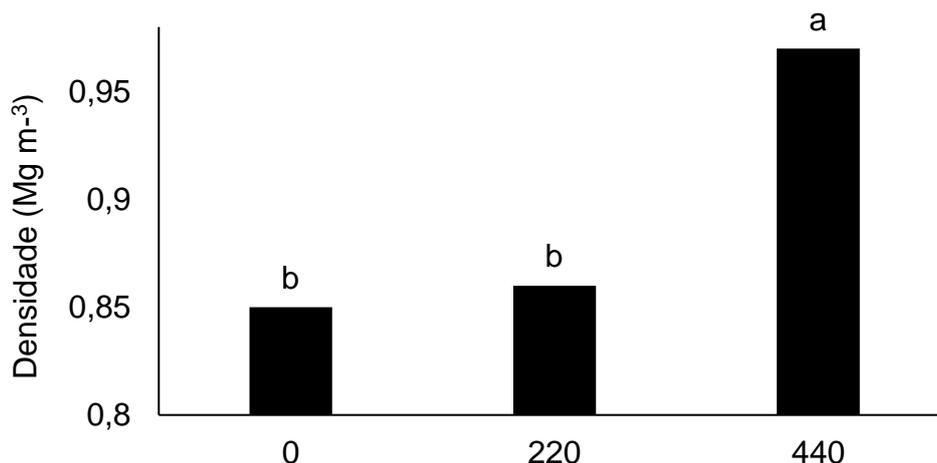


**Figura 44:** Umidade do solo nas diferentes práticas mecânicas no momento da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A escarificação, por expor mais o solo em relação ao uso da haste sulcadora e disco duplo, facilita também perda de água. Bragagnolo e Mielniczuk, (1990), já relataram que sistemas conservacionistas reduzem a temperatura máxima do solo e, conseqüentemente, causam reflexos positivos no teor de água do solo. Além de que por razões estruturais, a retenção de água

no solo em plantio direto é maior que a em sistemas escarificados (KLEIN et al., 2008).

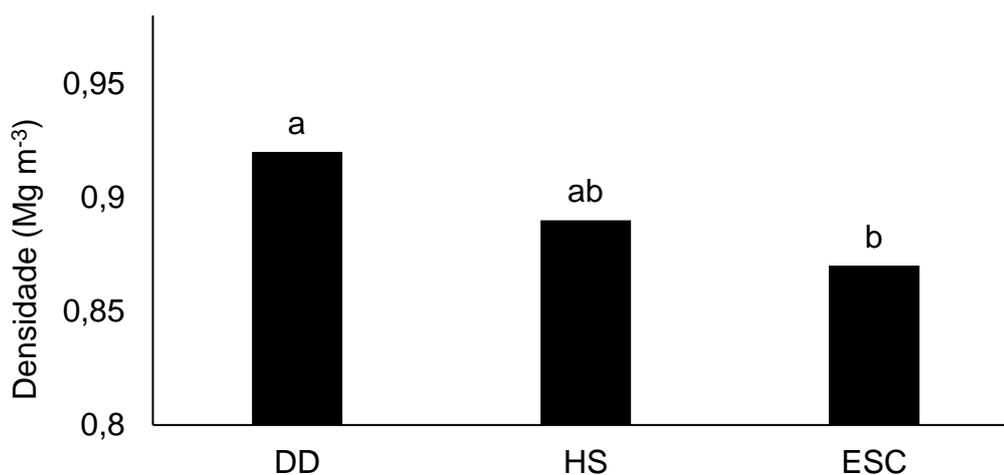
Ao se comparar os valores de densidade em função da carga aplicada, percebe-se que a mesma continua maior na área mais compactada (440 kPa), conforme apresentado na Figura 45.



**Figura 45:** Densidade do solo nos diferentes níveis de compactação no momento da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A densidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m, na carga de 220 kPa, não difere da área sem compactação (0 kPa). No entanto, 12 meses atrás, havia diferença. Em um ano, portanto, o solo é capaz de (no quesito densidade) retornar a sua condição anterior após sofrer uma pressão de 220 kPa.

A variação da densidade em função do sistema de preparo do solo no momento da determinação da  $K_{sat}$  está apresentada na Figura 46.

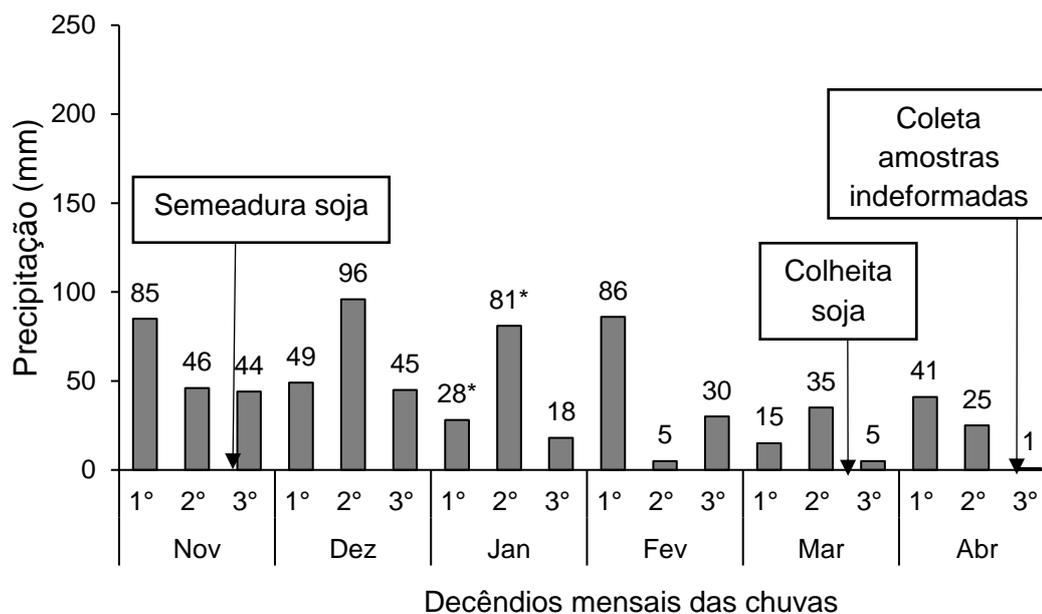


**Figura 46:** Densidade do solo nos diferentes sistemas de preparo do solo da determinação da condutividade hidráulica saturada. Médias seguidas da mesma letra minúscula (nas barras) não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

O maior valor de densidade é observado na área sem prática mecânica de descompactação (uso do disco duplo), o menor na área escarificada e intermediário na área com uso da haste sulcadora. Se tratando da densidade, portanto, a escarificação continua apresentando efeitos, assim como a haste sulcadora, que após apenas um uso na área, já foi capaz de alterar a densidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m, o que mais uma vez mostra seu potencial em descompactar o solo.

#### 6.1.5. Análises realizadas durante e após o segundo ciclo de soja

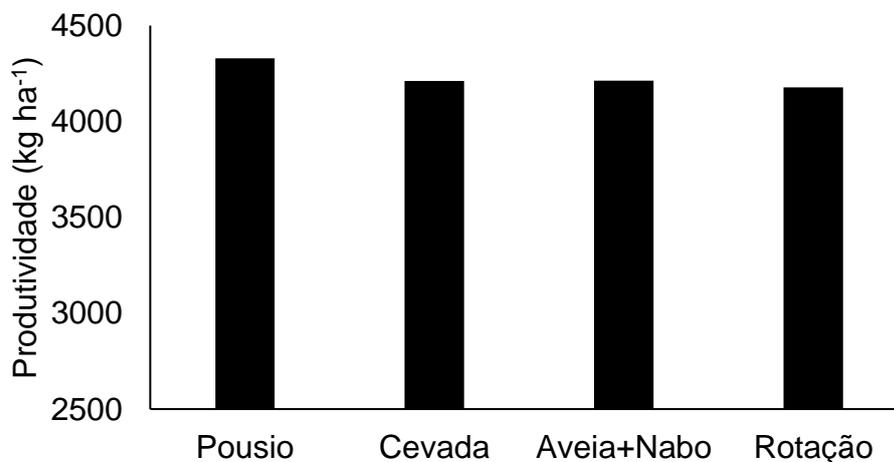
Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 22 de novembro de 2019 (data da semeadura da soja) até 28 de abril de 2020 (coleta das amostras indeformadas de solo). Englobam a semeadura e a colheita da soja, bem como uma coleta de amostras de estrutura preservada para determinação de densidade, porosidade, condutividade hidráulica saturada, permeabilidade ao ar e a retenção de água no solo. A precipitação deste período está apresentada na Figura 47.



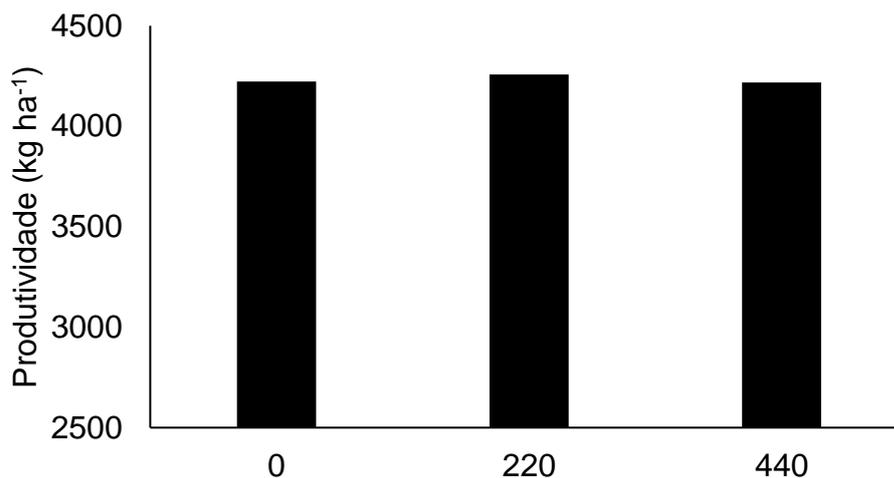
**Figura 47:** Decêndios mensais das chuvas entre os meses de novembro de 2019 e abril de 2020. \*A estação meteorológica estava inoperante entre 07 e 17 de janeiro de 2020, portanto foram utilizados os dados da estação de Foz do Jordão (cerca de 10 km do experimento).

#### 6.1.5.1. Rendimento da soja

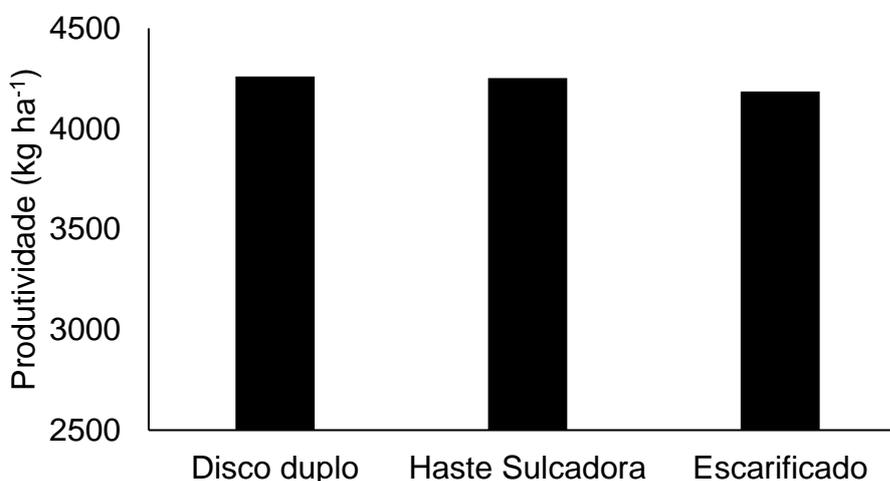
Apesar das diferenças apresentadas em parâmetros de solo, mais uma vez a cultura da soja se apresentou tolerante as diferentes condições impostas pelos tratamentos. Tal fato implicou produtividades semelhantes em todos os tratamentos estudados, conforme apresentado nas Figuras 48, 49 e 50.



**Figura 48:** Produtividade de soja em função dos sistemas de cultura utilizados.



**Figura 49:** Produtividade de soja em função dos níveis de compactação aplicados.



**Figura 50:** Produtividade de soja em função dos sistemas de preparo utilizados.

A cultura da soja, portanto, não foi sensível o suficiente para perceber as alterações causadas pelos tratamentos nos atributos do solo nas condições em que este estudo foi conduzido. Em um ano com déficit hídrico acentuado possivelmente o rendimento da cultura poderia ser afetado (DENARDIN, FAGANELLO; SANTI, 2008), visto que a menor precipitação ocorreu no segundo decêndio de fevereiro (5 mm). No entanto, no decêndio anterior ocorreu um total de precipitação de 86 mm e no posterior 30 mm.

#### 6.1.5.2. Densidade e porosidade

Após a colheita da soja, realizou-se uma coleta de solo detalhada, afim de determinar a densidade, porosidade, retenção de água, permeabilidade

ao ar e condutividade hidráulica do solo saturado em diferentes profundidades. Neste momento, todas as parcelas estavam em condições semelhantes (todas com a palhada da soja). Os resultados de densidade e porosidade do solo da camada de 0,00 - 0,10 m estão apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13:** Densidade, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade nos tratamentos sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo.

----- Tratamento -----		Densidade (Mg m <sup>-3</sup> )	Ma (%)	Mi (%)	PT (%)
Sistema de cultura	Pousio	0,95 <sup>ns</sup>	13,9 <sup>ns</sup>	49,4 <sup>ns</sup>	63,3 <sup>ns</sup>
	Cevada	0,94 <sup>ns</sup>	13,4 <sup>ns</sup>	50,1 <sup>ns</sup>	63,4 <sup>ns</sup>
	Aveia+nabo	0,90 <sup>ns</sup>	17,0 <sup>ns</sup>	48,3 <sup>ns</sup>	65,3 <sup>ns</sup>
	Milheto/aveia+nabo	0,90 <sup>ns</sup>	17,6 <sup>ns</sup>	47,6 <sup>ns</sup>	65,2 <sup>ns</sup>
Carga aplicada (kPa)	0 kPa	0,90 <sup>ns</sup>	16,5 <sup>ns</sup>	48,7 <sup>ns</sup>	65,2 <sup>ns</sup>
	220 kPa	0,93 <sup>ns</sup>	15,3 <sup>ns</sup>	48,6 <sup>ns</sup>	63,9 <sup>ns</sup>
	440 kPa	0,93 <sup>ns</sup>	14,7 <sup>ns</sup>	49,2 <sup>ns</sup>	63,9 <sup>ns</sup>
Sistema de preparo	Disco duplo	0,96 <sup>a</sup>	11,7 <sup>b</sup>	51,1 <sup>a</sup>	62,9 <sup>b</sup>
	Haste sulcadora	0,92 <sup>ab</sup>	15,7 <sup>a</sup>	48,6 <sup>b</sup>	64,3 <sup>ab</sup>
	Escarificado	0,88 <sup>b</sup>	19,0 <sup>a</sup>	46,7 <sup>b</sup>	65,8 <sup>a</sup>

Letras iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, comparando as médias dentro de cada fator estudado. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

Na camada de 0,00 - 0,10 m, nos sistemas de cultura e nos níveis de compactação, apesar de apresentarem a mesma tendência dos dados de densidade observados antes da semeadura da soja, neste momento as diferenças não são mais significativas. Logo, atribui-se à cultura da soja a atenuação dessas diferenças. O único fator que causou diferenças em todos os parâmetros analisados (densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total) foram os diferentes sistemas de preparo do solo. Cabe lembrar

que na época das avaliações já haviam se passado 25 meses da execução da escarificação e a haste sulcadora já havia sido utilizada em duas safras.

A densidade diminuiu significativamente com a mobilização do solo, sendo maior na área cultivada com disco duplo, intermediária na área com haste sulcadora e menor na área escarificada. A porosidade total apresentou o mesmo comportamento, portanto, mantendo os efeitos da escarificação no solo.

Já nos quesitos macroporosidade e microporosidade, estes respectivamente aumentaram e diminuíram conforme a mobilização do solo. No entanto, os valores obtidos com a haste sulcadora não diferiram dos obtidos na área com escarificação, ou seja, o uso em dois cultivos da haste sulcadora que mobiliza sete vezes menos solo quando comparada ao escarificador, já é capaz de aumentar a macroporosidade do solo a um patamar semelhante ao obtido em área escarificada há dois anos.

A macroporosidade, avaliada na profundidade de 0,00 - 0,10 m, apresentou interação significativa entre as cargas aplicadas e os sistemas de preparo (Tabela 14).

**Tabela 14:** Macroporosidade do solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade - interação entre os preparos do solo e as cargas aplicadas.

Cargas aplicadas	Sistemas de preparo		
	Disco Duplo	Haste sulcadora	Escarificado
	-----Macroporosidade (%)-----		
0 kPa	16,1 a A	15,7 a A	17,7 a A
220 kPa	9,3 b B	15,0 a B	21,6 a A
440 kPa	9,8 b B	16,4 a A	17,7 a A

Letras iguais na linha indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As letras minúsculas comparam os sistemas de preparo (colunas) e as maiúsculas comparam as cargas aplicadas (linhas).

Na área sem compactação, percebe-se que não se faz necessário o uso de alguma prática mecânica de mitigação, visto que a macroporosidade foi semelhante nos três sistemas de preparo. Já nos níveis intermediário e elevado

de compactação, a macroporosidade (Ma) aumentou com a mobilização do solo, sendo que no nível intermediário (220 kPa), o menor valor de Ma ocorreu na área manejada com disco duplo, não diferindo da área manejada com haste sulcadora, e o maior valor ocorrendo na área escarificada. Já na área mais compactada (440 kPa), a Ma na área manejada com uso de haste sulcadora foi significativamente igual a escarificada, sendo estas maiores que as manejadas com o disco duplo. Tal fato mais uma vez aponta a eficiência da haste sulcadora para o manejo da compactação, pois torna os valores de Ma semelhantes aos obtidos na área escarificada. Na camada de 0,10 - 0,20 m, conforme apresentado na Tabela 15, o comportamento foi semelhante ao ocorrido na camada de 0,00 - 0,10 m, porém com variações ocorrendo apenas em fatores isolados.

**Tabela 15:** Densidade, macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade em todos tratamentos - sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo.

----- Tratamento -----		Densidade (Mg m <sup>-3</sup> )	Ma (%)	Mi (%)	PT (%)
Sistema de cultura	Pousio	1,06 <sup>ns</sup>	17,9 <sup>ns</sup>	40,9 <sup>ns</sup>	58,8 <sup>ns</sup>
	Cevada	1,05 <sup>ns</sup>	17,9 <sup>ns</sup>	41,2 <sup>ns</sup>	59,1 <sup>ns</sup>
	Aveia+nabo	1,04 <sup>ns</sup>	18,1 <sup>ns</sup>	41,7 <sup>ns</sup>	59,8 <sup>ns</sup>
	Milheto/aveia+nabo	1,05 <sup>ns</sup>	18,2 <sup>ns</sup>	41,0 <sup>ns</sup>	59,2 <sup>ns</sup>
Carga aplicada (kPa)	0	1,05 <sup>ns</sup>	18,9 <sup>ns</sup>	40,5 <sup>ns</sup>	59,4 <sup>ns</sup>
	220	1,04 <sup>ns</sup>	18,9 <sup>ns</sup>	40,7 <sup>ns</sup>	59,6 <sup>ns</sup>
	440	1,06 <sup>ns</sup>	16,3 <sup>ns</sup>	42,4 <sup>ns</sup>	58,7 <sup>ns</sup>
Sistemas de preparo	Disco duplo	1,09 <sup>a</sup>	16,0 <sup>b</sup>	42,0 <sup>a</sup>	57,9 <sup>b</sup>
	Haste sulcadora	1,06 <sup>a</sup>	17,5 <sup>b</sup>	41,3 <sup>ab</sup>	58,8 <sup>b</sup>
	Escarificado	1,01 <sup>b</sup>	20,7 <sup>a</sup>	40,3 <sup>b</sup>	61,0 <sup>a</sup>

Letras iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, comparando as médias dentro de cada fator estudado. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

Entre os sistemas de cultura, é possível observar valores um pouco menores de macroporosidade nas áreas em pousio e com cevada, nas cargas aplicadas também se observa valor inferior de macroporosidade no nível de compactação mais elevado. No entanto, nenhum dos casos é significativo.

Já entre os sistemas de preparo, a escarificação foi a mais eficiente em descompactar o solo, apresentando menor densidade, maior macroporosidade, menor microporosidade e maior porosidade total. Apesar do tratamento haste sulcadora apresentar valores intermediários entre a área com disco duplo e escarificada, estatisticamente ela não diferiu da área manejada com disco duplo, e no quesito microporosidade não diferiu também da área escarificada. Logo, para a camada de 0,10 - 0,20 m, o uso da haste sulcadora em duas safras não foi capaz de causar alterações significativas nos parâmetros de base massa e volume do solo. Uma justificativa para isso é que a profundidade de atuação da haste sulcadora, que não atinge integralmente toda essa camada de solo, a mobilização é apenas na linha de semeadura.

Na camada de 0,20 - 0,30 m o único parâmetro determinado foi a densidade. E, assim como nas camadas de 0,00 - 0,10 m e 0,10 - 0,20 m, o único fator que causou variação, foram os sistemas de preparo (Tabela 16).

Percebe-se que com o aumento da profundidade estudada, ocorrem reduções nas variações causadas pelos tratamentos. Apesar dos sistemas de preparo causarem alterações significativas na densidade, esta já é bem menos expressiva quando comparado a variação nas demais camadas. Em valores absolutos, com o aumento da mobilização, ocorreram decréscimos nos valores de densidade, onde o tratamento com disco duplo apresentou o maior valor, enquanto o escarificado o menor e, onde foi usado a haste sulcadora, valor intermediário. Sabendo que a profundidade de atuação da haste sulcadora é de até 0,19 m, pode-se inferir que abaixo disso a mesma possa causar rachaduras no solo, visto a redução da densidade na camada de 0,20 - 0,30 m.

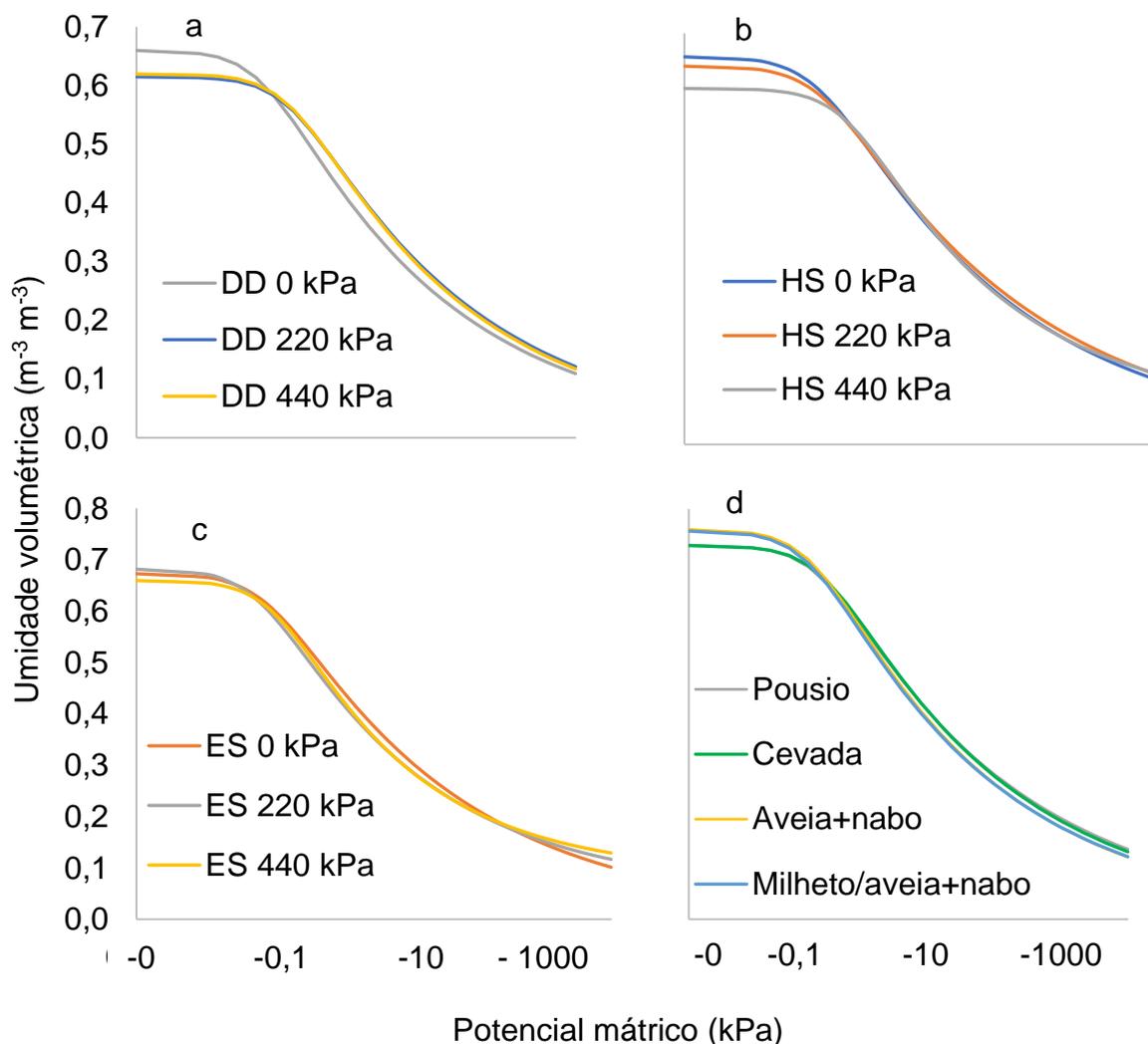
**Tabela 16:** Densidade do solo na camada de 0,20 - 0,30 m de profundidade em todos tratamentos - sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo.

-----Tratamento -----		Densidade (Mg m <sup>-3</sup> )
Sistema de cultura	Pousio	1,00 <sup>ns</sup>
	Cevada	1,00 <sup>ns</sup>
	Aveia+nabo	1,00 <sup>ns</sup>
	Milheto/aveia+nabo	0,99 <sup>ns</sup>
Carga aplicada (kPa)	0	1,00 <sup>ns</sup>
	220	0,98 <sup>ns</sup>
	440	1,01 <sup>ns</sup>
Sistema de preparo	Disco duplo	1,01 a
	Haste sulcadora	1,00 ab
	Escarificado	0,97 b

Letras iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, comparando as médias dentro de cada fator estudado. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

#### 6.1.5.3. Retenção e disponibilidade de água no solo

Em alguns dos potenciais mátricos estudados, a retenção de água teve efeito significativo da interação entre sistemas de preparo e níveis de compactação, enquanto as culturas apresentaram apenas diferenças de forma isolada (Figura 51).



**Figura 51:** Curvas de retenção de água no solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade, nas interações preparos o solo x cargas aplicadas (a,b e c) e nos sistemas de cultura estudados (d). Legenda: DD (disco duplo), HS (haste sulcadora), ES (escarificação).

Na Figura 51a, onde são apresentadas as curvas dos diferentes níveis de compactação na área com uso do disco duplo, verifica-se que, na área sem compactação, o solo retém mais água na parte inicial da curva (chamada parte úmida) e menos na parte final (parte seca), justificado pela maior macroporosidade ocorrente neste tratamento. As curvas dos níveis intermediário e elevado de compactação (220 e 440 kPa) são praticamente iguais em todos os potenciais matriciais.

Já na Figura 51b, onde são apresentadas as curvas dos diferentes níveis de compactação na área com uso da haste sulcadora, as únicas diferenças ocorrem na parte inicial da curva, sendo que as áreas sem e com o

nível intermediário de compactação (0 e 220 kPa) apresentam maior retenção de água, enquanto a área mais compactada a menor. No entanto, a partir do potencial de -0,1 kPa, as curvas dos três tratamentos são semelhantes.

Na Figura 51c, que apresenta as curvas dos diferentes níveis de compactação na área com uso do escarificador, percebe-se que a retenção de água não é afetada pelos níveis de compactação, talvez pelo motivo da escarificação ter proporcionado maior homogeneidade ao mobilizar o solo.

Entre os sistemas de culturas estudados (Figura 51d), as únicas diferenças também ocorrem na parte inicial da curva, sendo que os tratamentos aveia+nabo e milho/aveia+nabo apresentam maior retenção de água, quando comparados aos tratamentos pousio e cevada. A partir da tensão de -0,1 kPa, a retenção de água nos tratamentos foi semelhante.

Analisando em conjunto, percebe-se que a retenção de água é regida principalmente pela macroporosidade do solo, retendo mais água na parte inicial da curva, quando esta é maior. Nesta mesma camada (0,00 - 0,10 m) ocorreu também uma interação significativa entre os sistemas de preparo e níveis de compactação na quantidade de água disponível (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa), sendo os resultados apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17:** Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) na interação entre os preparos do solo e as cargas aplicadas na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade.

Cargas aplicadas	Sistemas de preparo		
	Disco Duplo	Haste sulcadora	Escarificado
	-----Água disponível (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )-----		
0 kPa	0,18 b A	0,17 a A	0,17 a A
220 kPa	0,19 ab A	0,17 a A	0,15 a B
440 kPa	0,19 a A	0,17 a B	0,14 a B

Letras iguais na linha indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As letras maiúsculas comparam os sistemas de preparo (colunas) e as minúsculas comparam as cargas aplicadas (linhas).

Os níveis de compactação causaram diferenças na quantidade de água disponível apenas na área com uso de disco duplo, sendo que esta aumentou com o aumento da compactação. Devido a área compactada apresentar maior microporosidade, com capacidade de reter água em potenciais mais negativos (solo mais seco), a quantidade de água disponível acaba sendo maior. Comportamento semelhante foi observado por Silva et al., (2006), que perceberam que a área compactada, apesar de não apresentar maior conteúdo de água disponível, apresentou maior retenção de água.

Os sistemas de cultura não alteraram a quantidade de água disponível no solo (Tabela 18).

**Tabela 18:** Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) nos sistemas de culturas estudados na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade.

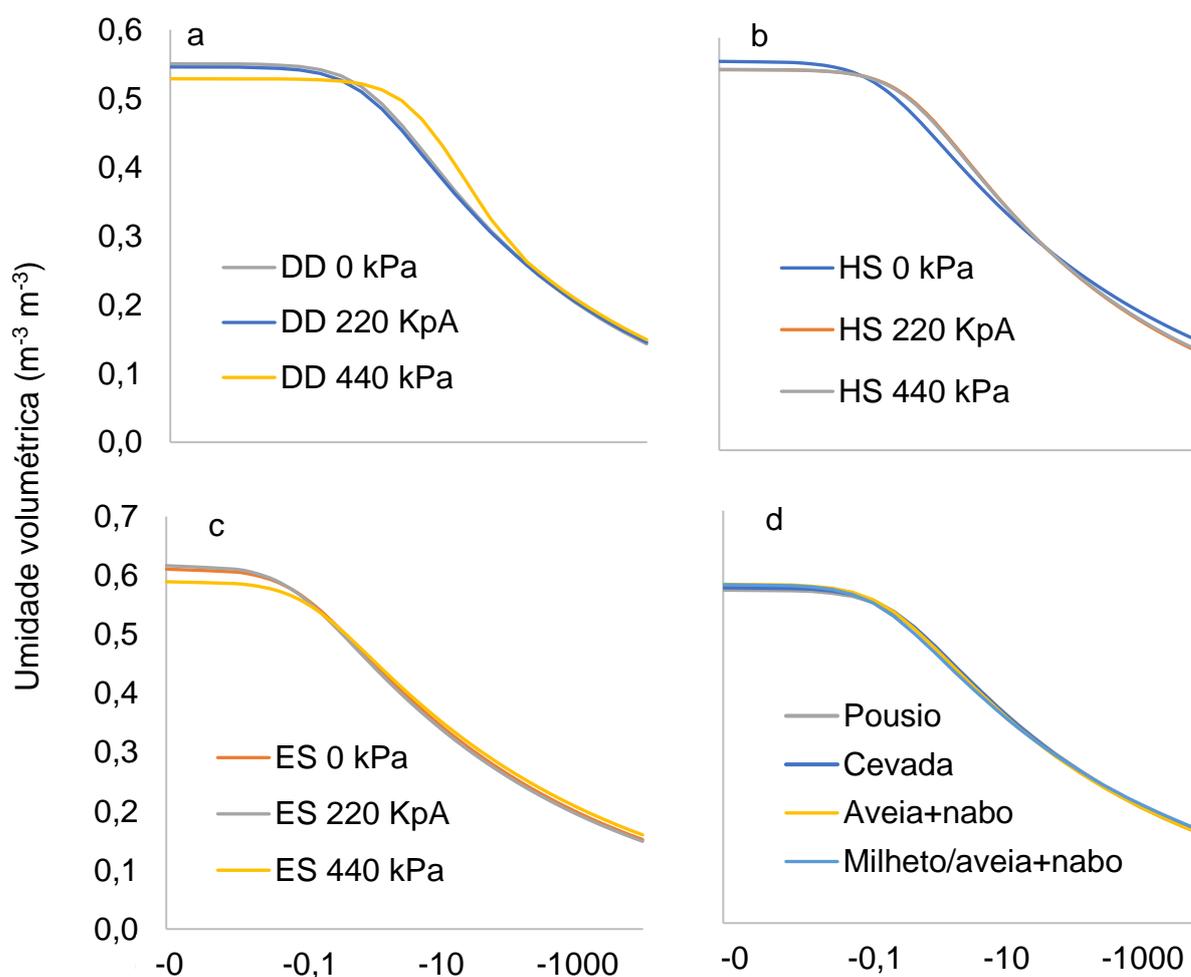
Sistemas de culturas <sup>ns</sup>			
Pousio	Cevada	Aveia+nabo	Milheto/aveia+nabo
-----Água disponível (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )-----			
0,17	0,18	0,17	0,17

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

Percebe-se um valor ligeiramente maior de água disponível na área cultivada com cevada (não significativo), mas segue a mesma explicação supracitada, em que a área mais compactada, apresenta maior microporosidade e, conseqüentemente, mais água disponível.

Na camada de 0,10 - 0,20 m o comportamento ocorrido foi semelhante ao reportado na camada de 0,00 - 0,10 m, no entanto, menos expressivo (Figura 51).

Na Figura 52a, onde são apresentadas as curvas de retenção de água dos diferentes níveis de compactação, verifica-se que no tratamento com uso do disco duplo, sem e com nível intermediário de compactação (0 e 220 kPa), o comportamento das curvas é praticamente igual em todos os potenciais matriciais. Já o mais compactado (440 kPa), reteve menos água na parte inicial da curva, mais na parte central, e valores semelhantes às demais no terço final.



**Figura 52:** Curvas de retenção de água no solo na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade. Nas interações preparos do solo x cargas aplicadas (a,b e c) e nos sistemas de cultura estudados (d). Legenda: DD (disco duplo), HS (haste sulcadora), ES (escarificação).

Já na Figura 52b, onde são comparados os níveis de compactação na área com uso da haste sulcadora, percebe-se que as curvas são muito semelhantes. A área sem compactação apresenta retenção de água ligeiramente maior no terço inicial e final da curva e ligeiramente menor no terço central.

Na Figura 52c, que apresenta as curvas dos diferentes níveis de compactação na área com uso do escarificador, percebe-se que a retenção de água quase não é afetada pelos níveis de compactação. Nota-se apenas uma ligeira redução na retenção de água na área mais compactada no terço inicial da curva.

Já os sistemas de culturas estudados (Figura 52d) não causaram diferenças na curva de retenção de água. Conforme já esperado, as culturas têm ação mais lenta, fazendo com que as diferenças sejam mais expressivas na camada superficial e reduzidas nas camadas mais profundas.

Em relação a água disponível na camada de 0,10 - 0,20 m, apesar de apresentar comportamento semelhante ao apresentado na camada de 0,00 - 0,10 m, as diferenças não foram significativas para nenhuma das interações estudadas. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 19 e 20.

**Tabela 19:** Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) na interação entre os preparos do solo e as cargas aplicadas na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade.

Cargas aplicadas <sup>ns</sup>	Sistemas de preparo <sup>ns</sup>		
	Disco Duplo	Haste sulcadora	Escarificado
-----Água disponível (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )-----			
0 kPa	0,20	0,16	0,16
220 kPa	0,19	0,19	0,16
440 kPa	0,24	0,19	0,16

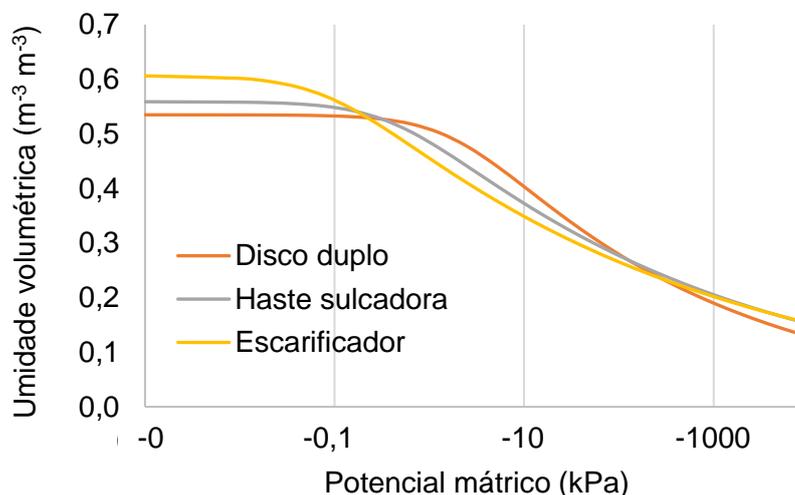
<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

**Tabela 20:** Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) nos sistemas de cultura estudados na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade.

Sistema de cultura <sup>ns</sup>			
Pousio	Cevada	Aveia+nabo	Milheto/aveia+nabo
-----Água disponível (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )-----			
0,17	0,17	0,17	0,16

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

No entanto, ao analisar separadamente os sistemas de preparo, é possível verificar diferenças, principalmente nos dois terços iniciais da curva de retenção de água (Figura 53).



**Figura 53:** Curva de retenção de água no solo na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade nos diferentes preparos de solo.

No terço inicial da curva de retenção de água, os valores são superiores no tratamento escarificado, intermediário no com haste sulcadora e inferior no disco duplo; ou seja, neste terço a retenção aumentou com o aumento da mobilização do solo. No terço central ocorre o comportamento inverso e no terço final as curvas ficam semelhantes. Tal fato segue a explicação já citada anteriormente, de que o solo menos denso apresenta maior macroporosidade (permitindo maior retenção na parte inicial da curva), enquanto que solo mais denso apresenta maior microporosidade e, conseqüentemente, maior capacidade de reter água em potenciais mais negativos. Isso acarretou em diferenças também na água disponível no solo, no entanto, não significativas (Tabela 21).

**Tabela 21:** Água disponível, (entre os potenciais de -10 e -1500 kPa) nos sistemas de preparo estudados na camada de 0,10 - 0,20 m de profundidade.

Sistema de preparo <sup>ns</sup>		
Disco duplo	Haste Sulcadora	Escarificado
-----Água disponível (m <sup>-3</sup> m <sup>-3</sup> )-----		
0,23	0,18	0,16

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

A água disponível decresce com a mobilização do solo. O tratamento escarificado, portanto, é o que apresentou menor quantidade de água disponível. Pois pela sua maior macroporosidade, perde água mais facilmente em tensões maiores, comparado a uma amostra com menor macroporosidade.

#### 6.1.5.4. Condutividade hidráulica saturada em laboratório

Conforme já verificado na análise de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), logo após a aplicação das cargas na implantação do experimento, essa metodologia apresenta alto coeficiente de variação, o que dificulta, portanto, a obtenção de alguma diferença a nível estatístico. Os sistemas de cultura e os níveis de compactação não causaram diferenças em nenhuma das camadas analisadas (Tabelas 22 e 23).

**Tabela 22:** Condutividade hidráulica saturada do solo nos diferentes sistemas de cultura e camadas.

Profundidade (m)	Culturas			
	Pousio	Cevada	Aveia+nabo	Milheto-aveia+nabo
-----Condutividade hidráulica saturada (mm h <sup>-1</sup> )-----				
0,00 - 0,10 <sup>ns</sup>	1.175	1.324	865	1.021
0,10 - 0,20 <sup>ns</sup>	347	178	211	293

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

**Tabela 23:** Condutividade hidráulica saturada do solo nos diferentes níveis de compactação e camadas.

Profundidade (m)	Cargas (kPa)		
	0	220	440
	Condutividade hidráulica saturada (mm h <sup>-1</sup> )		
0,00 – 0,10 <sup>ns</sup>	1.210	1.065	1.014
0,10 – 0,20 <sup>ns</sup>	292	317	162

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

Já em relação aos sistemas de preparo, houve diferenças significativas na camada de 0,10 – 0,20 m (Tabela 24).

**Tabela 24:** Condutividade hidráulica saturada do solo nos diferentes sistemas de preparo e camadas.

Profundidade (m)	Sistemas de preparo		
	Disco	Haste	Escarificado
	Condutividade hidráulica saturada (mm h <sup>-1</sup> )		
0,00 - 0,10 <sup>ns</sup>	708	1.047	1.533
0,10 - 0,20 *	86 b	233 ab	452 a

<sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância. \*Letras iguais na linha não apresentam diferença pelo Teste Tukey a 5% de probabilidade.

Entre os sistemas de preparo, a menor K<sub>sat</sub> ocorreu na área com disco duplo, intermediária na área com haste sulcadora e a maior na área com escarificação. No entanto, na camada de 0,00 - 0,10 m as diferenças não foram significativas, enquanto na camada de 0,10 - 0,20 m a área escarificada diferiu da área com disco duplo e a área com haste sulcadora não diferiu das demais. Logo em mais uma variável, o uso da haste sulcadora em duas safras já foi capaz de proporcionar mudanças no solo a ponto de se equivaler ao uso do escarificador.

#### 6.1.5.5. Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar (Kar), que foi determinada apenas na camada de 0,00 - 0,10 m, não foi influenciada significativamente por nenhum dos tratamentos estudados. No entanto, os resultados apontam que a maior permeabilidade ao ar ocorreu em sistemas mais complexos de culturas, área sem compactação e com maior mobilização do solo (Tabelas 25 e 26), além de aumentar com a diminuição do conteúdo na amostra, visto que se relaciona diretamente com o espaço poroso livre de água.

**Tabela 25:** Permeabilidade ao ar em função dos sistemas de cultura.

Potencial (kPa)	Culturas			
	Pousio	Cevada	Aveia+nabo	Milheto- aveia+nabo
	-----Permeabilidade ao ar ( $\mu\text{m}^2$ )-----			
-6 <sup>ns</sup>	17	20	29	32
-10 <sup>ns</sup>	32	40	53	44

Entre os sistemas de cultura, quanto mais intensificado, maior a Kar. Assim, o pousio apresentou a menor Kar, seguido pela cevada e os tratamentos aveia+nabo e milho/aveia+nabo posteriormente, sendo que entre estes, um apresentou maior Kar no potencial -6 kPa e outro no potencial -10 kPa. De acordo com a classificação de Fish e Koppi (1994), os tratamentos pousio e cevada apresentaram permeabilidade muito lenta no potencial de -6 kPa. As demais amostras foram classificadas como lenta e apenas o tratamento aveia+nabo no potencial de -10 kPa apresentou permeabilidade moderada. Silva et al, (2021), trabalhando em Argissolo encontraram valores de 18  $\mu\text{m}^2$  em área com soja e de 14  $\mu\text{m}^2$  em área com milho no potencial de -6 kPa, mas no potencial de -10 kPa, os valores foram semelhantes. Já neste estudo, ocorre aumento significativo da Kar ao passar do potencial de -6 para o de -10 kPa. Entre os valores absolutos, também é possível perceber que, de forma geral, a Kar foi maior no Latossolo.

Nos sistemas de preparo e cargas aplicadas, para melhor discriminação dos tratamentos, optou-se por apresentar os dados da interação (Tabela 26).

**Tabela 26:** Permeabilidade ao ar na interação entre as cargas aplicadas e os sistemas de preparo.

Cargas (kPa)	Sistemas de preparo		
	Disco duplo	Haste Sulcadora	Escarificado
	Permeabilidade ao ar no potencial -6 kPa ( $\mu\text{m}^2$ )		
0	41	25	35
220	10	22	41
440	10	22	35
	Permeabilidade ao ar no potencial -10 kPa ( $\mu\text{m}^2$ )		
0	63	54	37
220	16	48	52
440	18	37	43

Letras maiúsculas comparam as médias na linha (sistemas de preparo dentro da carga) pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

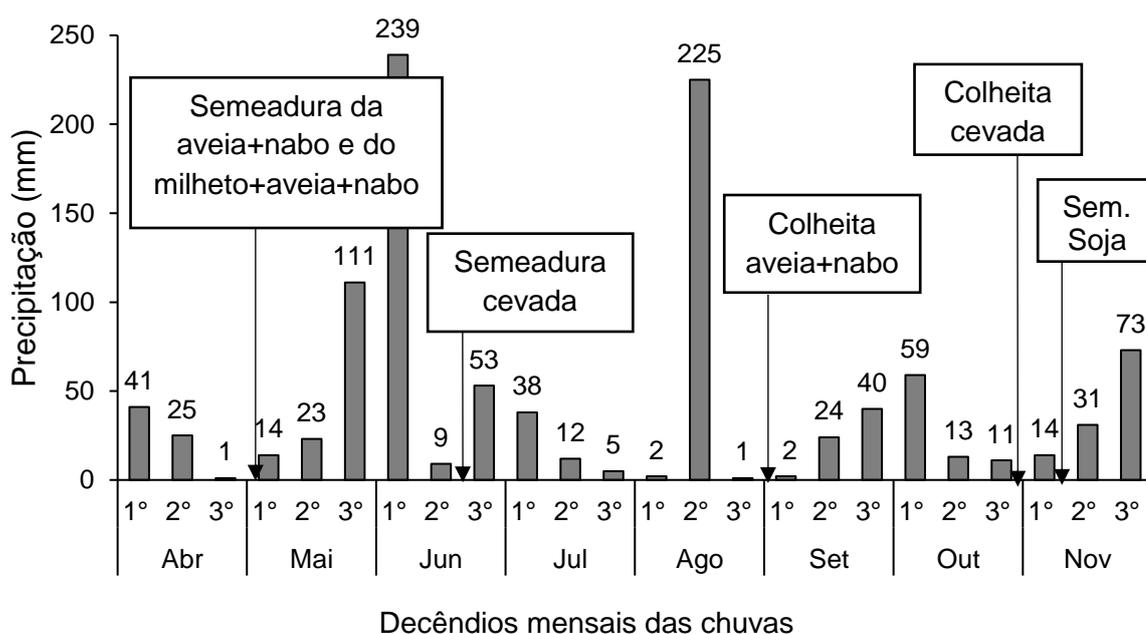
No tratamento disco duplo, a kar decresceu conforme o aumento da carga aplicada. No entanto, entre as cargas de 220 e 440 kPa, que são os níveis intermediário e elevado de compactação, os valores foram semelhantes nos dois potenciais estudados. No tratamento haste sulcadora, a kar se comportou de forma semelhante ao tratamento disco duplo, com exceção do potencial de -10 kPa, onde na carga de 220 kPa é perceptível maior diferença quando comparado a carga de 440 kPa. Já no tratamento com escarificação, os valores de Kar são semelhantes entre as cargas estudadas.

Analisando os resultados dentro de cada carga, percebe-se que na área sem compactação (carga de 0 kPa) ocorre um decréscimo da Kar com o aumento da mobilização do solo. Logo pode-se inferir que a mobilização comprometeu a conectividade dos poros, dificultando desta forma o deslocamento de ar no solo. Desta forma mobilizar o solo sem necessidade pode causar uma piora estrutural no mesmo. Já ao analisar as áreas que foram compactadas, a kar aumentou onde foi empregada a haste sulcadora, e ainda

mais ao utilizar-se o escarificador e, neste caso, justificando a mobilização do solo (a fim de aumentar a Kar).

6.1.6. Análises realizadas após o terceiro ciclo de culturas de outono/inverno

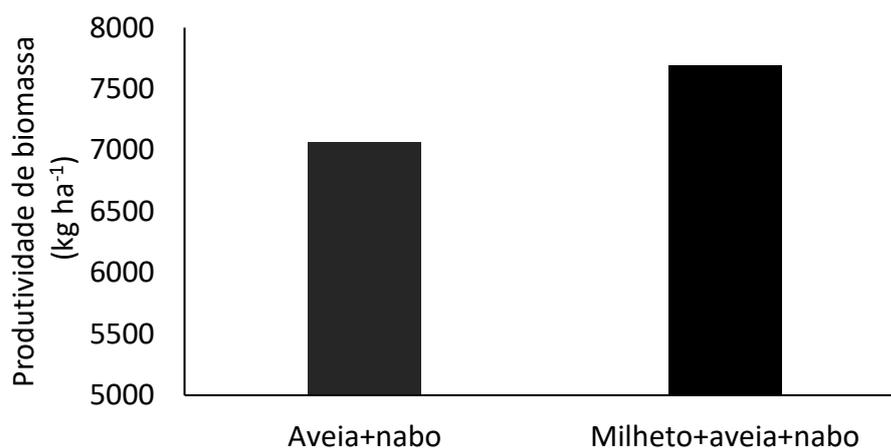
Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 28 de abril de 2020 (data da coleta das amostras de estrutura preservada de solo) até 07 de novembro de 2020 (data da semeadura da soja). Englobam, portanto, a semeadura e a colheita da aveia+nabo e do milho+aveia+nabo (neste ano, por problema de tempo, o milho foi semeado juntamente com a aveia e o nabo), semeadura e colheita da cevada, bem como as análises do solo de condutividade hidráulica saturada *in situ* e de resistência à penetração do solo. A precipitação deste período está apresentada na Figura 54.



**Figura 54:** Decênios mensais das chuvas entre os meses de abril de 2020 e novembro de 2020.

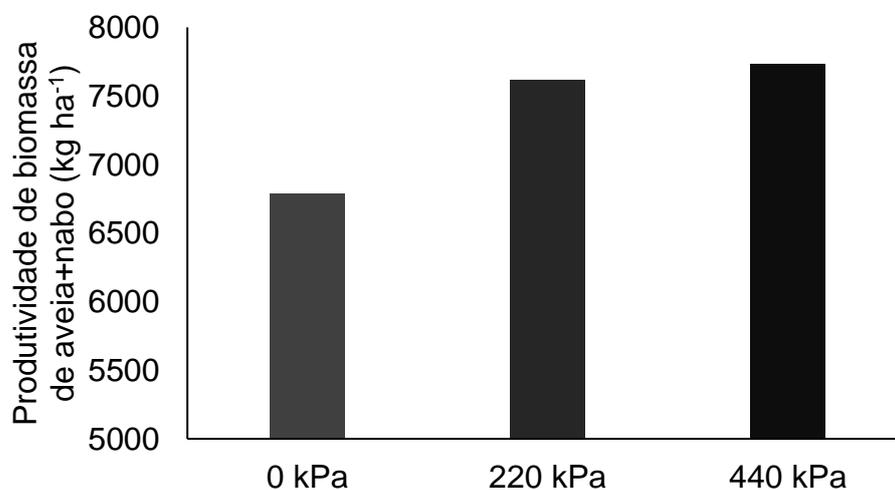
#### 6.1.6.1. Produção de biomassa de milho+aveia+nabo

Neste ano, devido a dificuldades de deslocamento até o experimento, o milho foi semeado no mesmo momento da semeadura da aveia+nabo, justificando o ligeiro incremento de produtividade de biomassa (não significativo) quando comparado ao sistema com aveia+nabo solteiros (Figura 55).



**Figura 55:** Produtividade de biomassa de aveia+nabo e de milheto+aveia+nabo.

As cargas aplicadas novamente não afetaram significativamente a produtividade de biomassa das culturas de milheto, aveia e nabo, conforme apresentado na Figura 56.

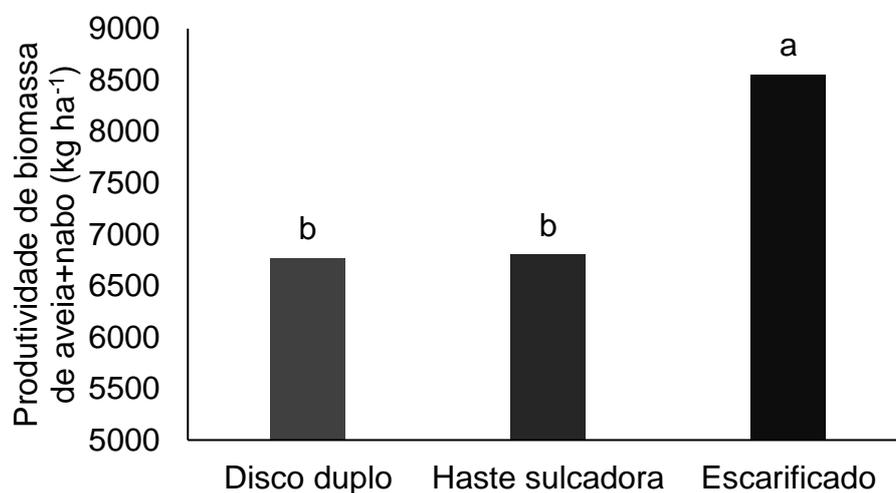


**Figura 56:** Produtividade de milheto+aveia+nabo em função do nível de compactação.

Percebe-se que ocorre um pequeno incremento na produtividade de biomassa com o aumento do nível de compactação do solo. Isso pode estar relacionado com o maior teor de água disponível nestas parcelas (vide item

6.1.5.3), visto as baixas precipitações ocorridas entre metade de julho até metade de agosto, onde as culturas estavam em pleno desenvolvimento.

A produtividade de biomassa das culturas em função da prática mecânica está apresentada na Figura 57.

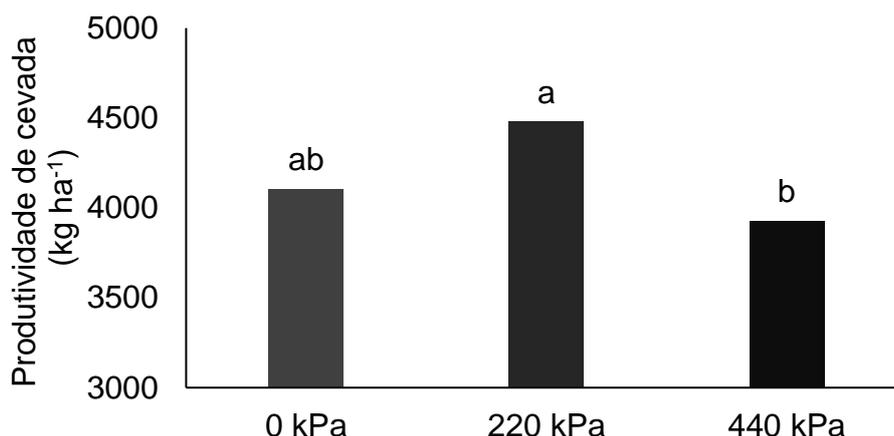


**Figura 57:** Produtividade de biomassa de milho+aveia+nabo em função dos sistemas de preparo. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Entre os sistemas de preparo, novamente na área com escarificação, o milho+aveia+nabo apresentaram maior produtividade de biomassa. Tal fato ocorre principalmente pela superioridade da cultura do nabo neste tratamento. Logo, por este comportamento (que também ocorreu na primeira safra), nos permite concluir que a escarificação é benéfica para o desenvolvimento do nabo, com o efeito tendo durabilidade superior a dois anos neste quesito.

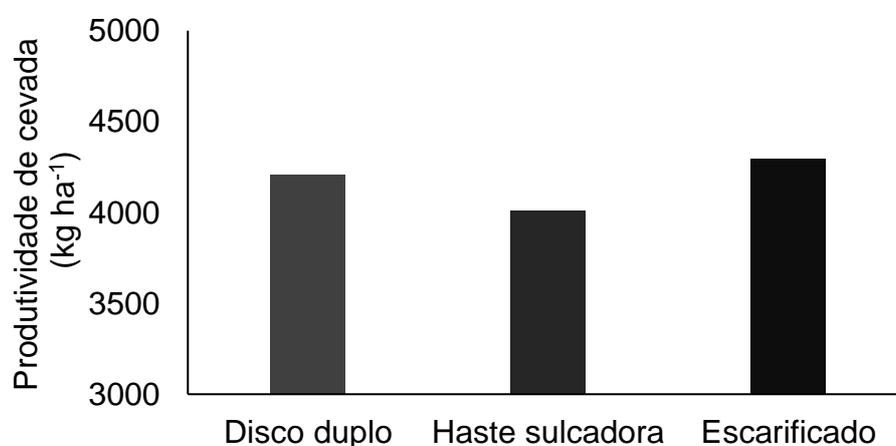
#### 6.1.6.2. Produtividade de cevada

A produtividade de cevada foi afetada pelos níveis de compactação (Figura 58).



**Figura 58:** Produtividade de grãos de cevada em função dos níveis de compactação. Barras de médias com mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

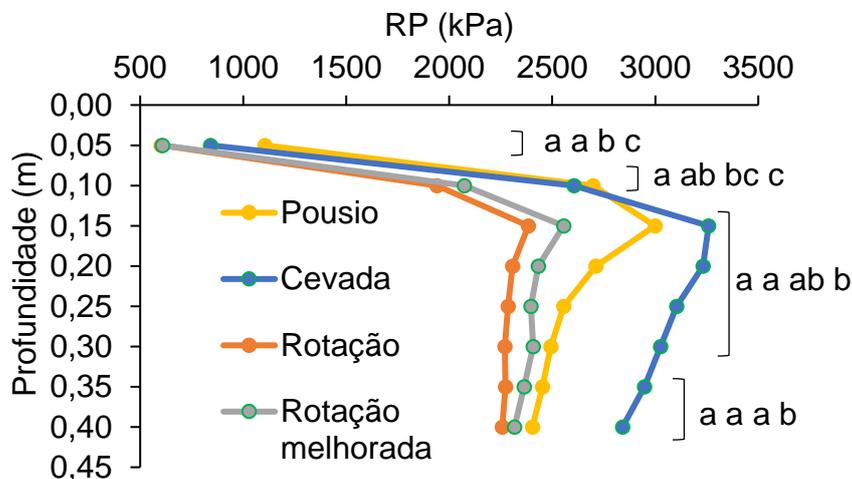
Dentre todas as safras analisadas, pela primeira vez a produtividade apresentou este comportamento, com a maior produtividade ocorrendo na área com compactação intermediária (sem diferir da área sem compactação) e a menor na área de compactação elevada (também sem diferir da área sem compactação). O que pode explicar esse comportamento é que a área com 220 kPa, ao mesmo tempo que teve maior disponibilidade de água, quando comparada a área de 0 kPa, também permitiu melhor desenvolvimento de raízes, quando comparado a área com 440 kPa. Logo, a soma destes dois fatores permitiu neste ano a maior produtividade nesta área. Para a cevada nesta safra, os sistemas de preparo não causaram diferenças na produtividade de grãos (Figura 59).



**Figura 59:** Produtividade de grãos de cevada em função dos sistemas de preparo.

### 6.1.6.3. Resistência à penetração do solo (RP)

Os sistemas de cultura causaram alterações nos valores de RP até a profundidade de 0,40 m (Figura 60).



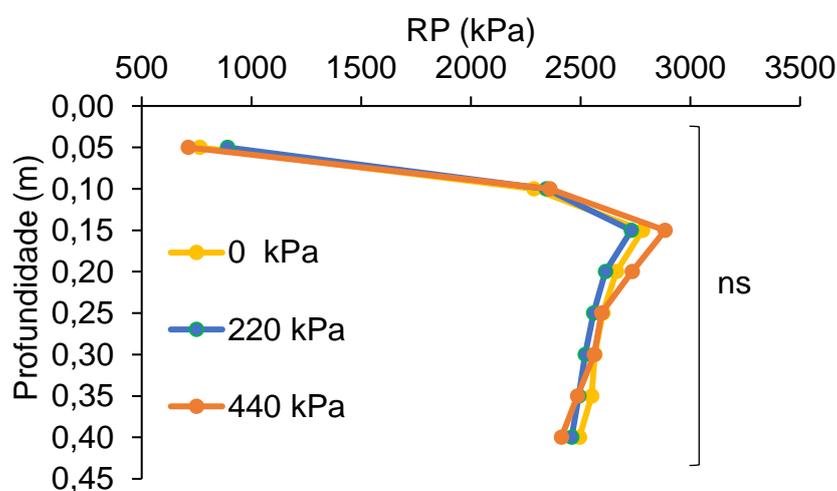
**Figura 60:** Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de cultura. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas de cultura, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico.

A área cultivada com cevada, com exceção da camada entre 0,00 m e 0,10 m, novamente apresentou os maiores valores de RP, não diferindo da área em pousio nas camadas de 0,05 - 0,30 m. Esse comportamento, conforme já discutido nos resultados de RP dos anos anteriores, ocorreu devido ao excessivo tráfego neste tratamento, principalmente referente ao tráfego da colhedora de parcelas.

A área em pousio apresentou o maior valor de RP na camada de 0,00 - 0,10 m (não diferindo da área com cevada na camada de 0,05 - 0,10 m) e, nas demais camadas, valor inferior ao da área com cevada e superior à dos demais tratamentos. Essa área mostra sua piora estrutural ao longo do tempo, com diferenças visíveis até a camada de 0,40 m, possivelmente pela diminuição nos teores de carbono orgânico, mas também pela menor capacidade de armazenamento de água neste tratamento, aumentando, portanto, a RP.

Os valores de RP entre os tratamentos rotação (aveia+nabo) e rotação melhorada (milheto/aveia+nabo) não diferiram em nenhuma das camadas estudadas, embora o tratamento milheto/aveia+nabo apresentou valores ligeiramente superiores, podendo ser causado pelo maior tráfego também nesta área, visto que recebe trator e semeadora uma vez a mais no ano para a semeadura do milheto.

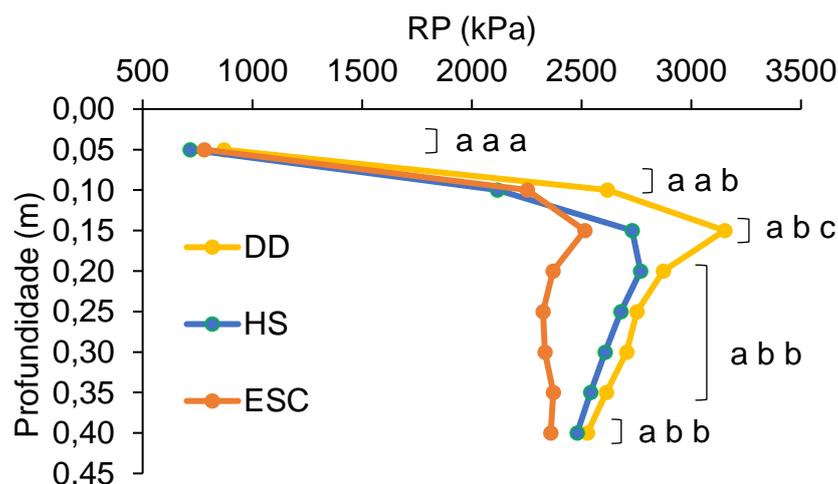
Os valores de RP nos diferentes níveis de compactação estão apresentados na Figura 61.



**Figura 61:** Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de cultura. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico, ns= não significativo pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Após 32 meses da aplicação das cargas, estas não apresentaram mais diferenças nos valores de RP. No entanto, percebe-se que, apesar de não significativo, os valores são ainda um pouco maiores na área mais compactada (440 kPa), enquanto que nas demais camadas são basicamente equivalentes.

Já os sistemas de preparo causaram alterações nos valores de RP (Figura 62).



**Figura 62:** Resistência à penetração (kPa) do solo nos diferentes sistemas de preparo. Teste de Tukey a 5% de probabilidade: as letras minúsculas fazem a comparação nas diferentes camadas, entre os sistemas de cultura, onde letras iguais indicam que não há diferença entre os tratamentos. Colchetes abrangem profundidades com o mesmo resultado estatístico. Legenda: DD: disco duplo, HS: haste sulcadora, ESC: escarificado.

Na camada superficial (0,00 - 0,05 m) os três sistemas de preparo apresentaram valores de RP semelhantes. Nas demais camadas (com exceção da de 0,05 – 0,10 m), a área escarificada apresentou os menores valores. A haste sulcadora apresentou valores intermediários de RP, no entanto, diferindo do tratamento disco duplo apenas entre as camadas de 0,05 - 0,15 m. Apesar da haste sulcadora atuar apenas até 0,19 m de profundidade, percebe-se que a atuação dela está causando ligeira redução da RP em todo perfil, o que pode ser ocasionado por pequenas rachaduras ou pelo estímulo ao desenvolvimento de raízes nestas camadas.

No tratamento disco duplo, o que chama a atenção são os altos valores de RP ocorridos nas camadas de 0,10 m e 0,15 m, chegando a ultrapassar o marco de 3.000 kPa, o que nos permite concluir que o próprio disco da sementeira (que atua até 0,10 m) está causando aumento da RP na camada imediatamente abaixo da zona de mobilização.

Moraes et al. (2014) sugeriram os valores de 3.000 e 3.500 kPa para plantio direto e escarificado respectivamente, como limitantes para o desenvolvimento das culturas em Latossolo. Os valores observados em todos

os tratamentos deste estudo são inferiores aos críticos sugeridos, desta forma não justificando a escarificação, mesmo este tratamento apresentando os menores valores de RP.

#### 6.1.6.4. Condutividade hidráulica saturada *in situ*

Neste ano, nenhum dos tratamentos estudados causou alterações nos valores de condutividade hidráulica saturada (Ksat) do solo (Tabela 27).

**Tabela 27:** Condutividade hidráulica saturada *in situ* (Ksat), densidade (Ds) e umidade gravimétrica (UG) do solo na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade em todos os tratamentos isolados. Sendo os sistemas de cultura, cargas aplicadas e sistemas de preparo.

----- Tratamento -----		Ksat (mm h <sup>-1</sup> )	Ds (Mg m <sup>-3</sup> )	UG (g g <sup>-1</sup> )
Sistema de cultura	Pousio	115 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>	0,25 c
	Cevada	68 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,27 b
	Aveia+nabo	106 <sup>ns</sup>	0,89 <sup>ns</sup>	0,32 a
	Milheto/aveia+nabo	106 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,31 a
Carga aplicada (kPa)	0 kPa	98 <sup>ns</sup>	0,90 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>
	220 kPa	99 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>
	440 kPa	100 <sup>ns</sup>	0,94 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>
Sistema de preparo	Disco duplo	87 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>
	Haste sulcadora	103 <sup>ns</sup>	0,91 <sup>ns</sup>	0,28 <sup>ns</sup>
	Escarificado	105 <sup>ns</sup>	0,93 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>

Letras iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, comparando as médias dentro de cada fator estudado. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

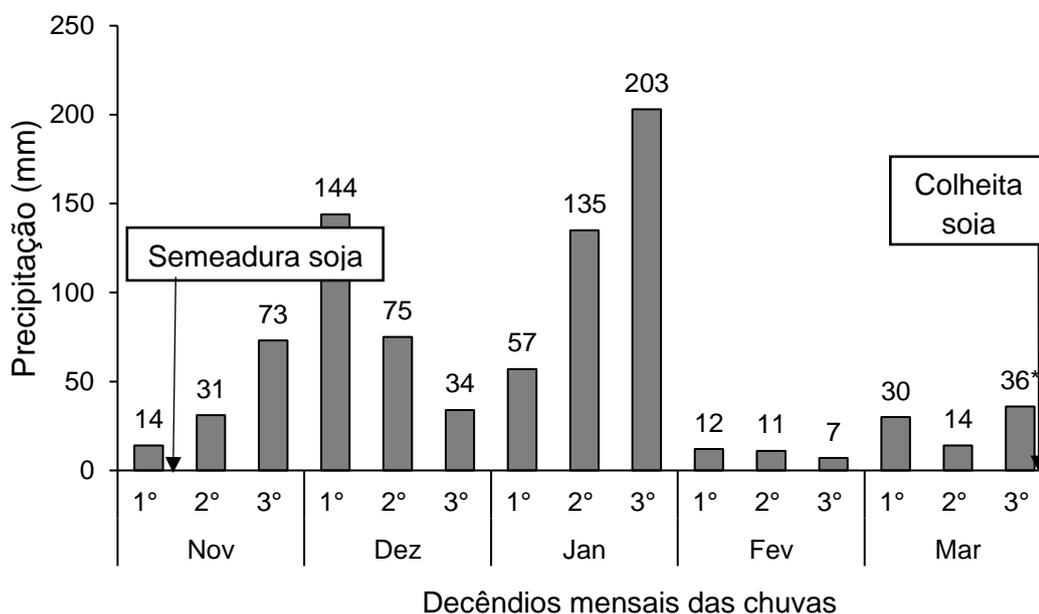
A Ksat foi semelhante entre os tratamentos. Dentre os sistemas de culturas, se destaca negativamente a área com cevada, que apresentou o menor valor. A densidade também foi semelhante entre os tratamentos estudados,

sendo ligeiramente maior apenas na área em pousio, visto a degradação da estrutura causada pelo impacto da gota de chuva na área sem cobertura.

O único fator que apresentou diferença significativa foi o teor de água no solo (umidade gravimétrica) entre os sistemas de culturas estudados. Como no momento da execução do teste (novembro) foi uma época com baixos índices pluviométricos (vide figura 54), os tratamentos com menor quantidade de biomassa sobre o solo apresentaram menores valores de teor de água, visto que o solo exposto absorve mais calor e, conseqüentemente, perde maiores conteúdos de água.

#### 6.1.7. Análises realizadas durante e após o terceiro ciclo de soja

Neste item estão abrangidas as atividades realizadas entre 07 de novembro de 2020 (data da semeadura da soja) até 30 de março de 2021 (data da colheita da soja e encerramento do experimento). Englobam a semeadura e a colheita da soja. A precipitação deste período está apresentada na Figura 63.

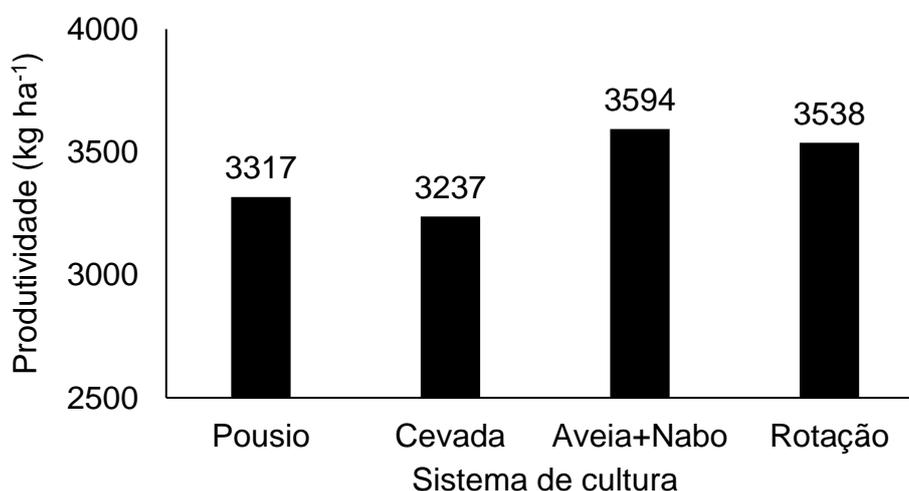


**Figura 63:** Decêndios mensais das chuvas entre os meses de novembro de 2020 e março de 2021.

##### 6.1.7.1. Produtividade de grãos de soja

Este ano foi o que a cultura da soja apresentou os menores valores de produtividade entre os anos estudados, principalmente devido ao déficit

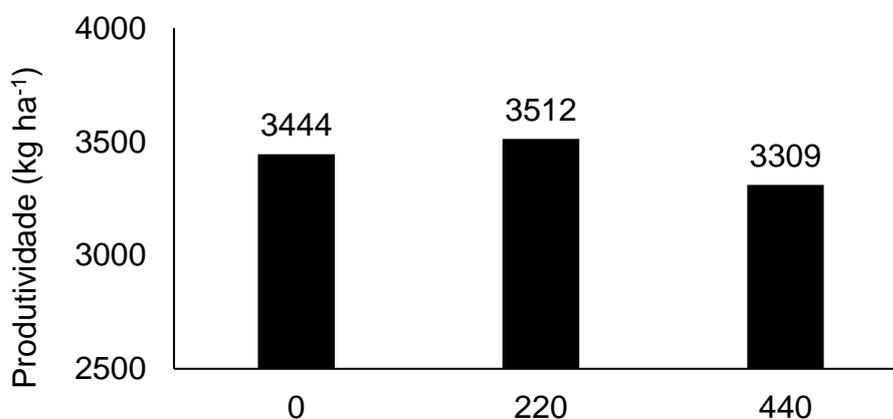
hídrico ocorrido nos dois últimos meses antecedentes a colheita. Apesar de apresentar algumas tendências, a produtividade de soja também não foi afetada por nenhum dos tratamentos estudados. A produtividade em função do sistema de cultura está apresentada na Figura 64.



**Figura 64:** Produtividade de soja em função do sistema de cultura utilizado.

Apesar de não significativo, os sistemas de cultura mais complexos, produziram cerca de 200 kg ha<sup>-1</sup> a mais de grãos quando comparados aos sistemas em pousio e com cevada. Possivelmente ao longo do tempo essas diferenças se tornariam mais significantes e mostraria mais claramente a importância destes sistemas de cultura.

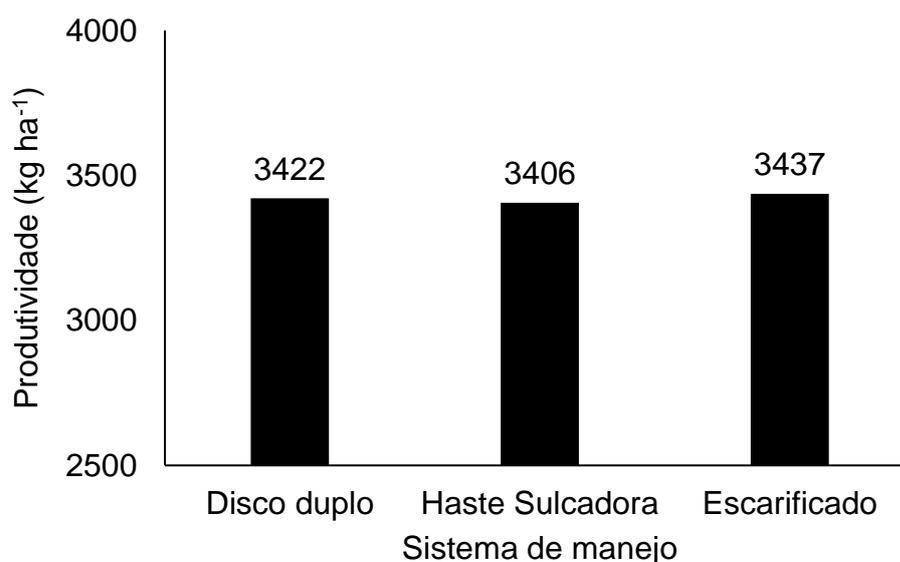
A produtividade em função das cargas aplicadas está apresentada na Figura 65.



**Figura 65:** Produtividade de soja em função do nível de compactação.

A produtividade da soja em função das cargas aplicadas apresentou comportamento semelhante ao da cevada neste ano, ocorrendo a maior produtividade na área com 220 kPa, intermediária na de 0 kPa e menor na de 440 kPa. Assim como na cevada, a soja sofreu déficit hídrico no final de seu ciclo. O tratamento 220 kPa, ao mesmo tempo que teve maior disponibilidade de água, quando comparada a área de 0 kPa, teve melhor desenvolvimento de raízes, quando comparado a área com 440 kPa. Ou seja, aliaram-se os fatores alta disponibilidade de água e baixa resistência à penetração das raízes, o que ocasionou essa pequena diferença na produtividade.

Já entre os sistemas de preparo, as diferenças de produtividade são praticamente nulas (Figura 66).

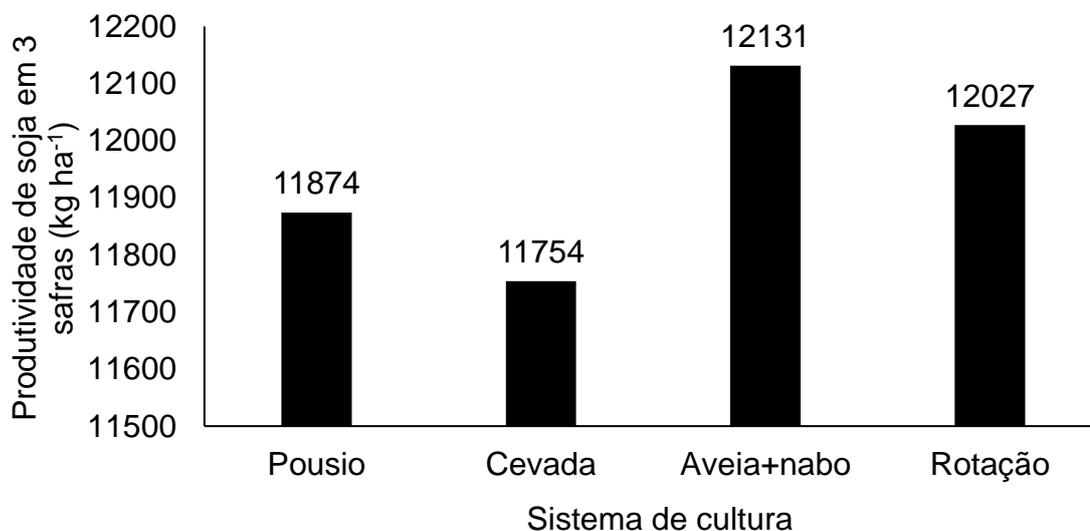


**Figura 66:** Produtividade de soja em função do sistema de preparo do solo.

#### 6.1.8. Safras conjuntas e sistemas de culturas

Objetivando detectar diferenças, optou-se por somar a produtividade de soja dos três anos estudados. Apesar de comportamento interessante

verificado em relação aos sistemas de preparo (Figura 67), esta novamente não apresentou diferenças significativas.



**Figura 67:** Soma da produtividade de soja nas 3 safras (2018,2019 e 2020) nos diferentes sistemas de cultura estudados.

Apesar de não significativo, percebe-se que os sistemas de culturas mais complexos tendem a proporcionar aumentos de até 3% na produtividade de soja. Usando a cotação atual da soja (150 reais), os ganhos podem chegar a quase 1.000 reais ha<sup>-1</sup> em três safras. Além disso, espera-se que, com o passar dos anos, esse efeito seja ainda mais expressivo, visto as diferentes quantidades de matéria seca aportadas em cada sistema.

O aporte de matéria seca para os diferentes tratamentos foi calculado com base nos resultados obtidos no próprio estudo, sendo que para o tratamento milho/aveia+nabo, foram usados para o cálculo apenas os valores dos dois primeiros anos, visto que no último, o milho foi semeado juntamente com a aveia+nabo, desconfigurando o sistema. A massa seca da soja e da cevada foram estimadas com base no índice de colheita proposto por Pierre et al, (2016), onde considera os índices 0,52 para a soja e 0,61 para a cevada. A determinação da matéria seca de soja e cevada foi portanto realizada pela seguinte equação:

$$MS = \frac{PROD}{IC} - PROD \quad (11)$$

Onde: MS= matéria seca, IC= índice de colheita e PROD= produtividade de grãos.

No pousio, o aporte ocorreu apenas pela soja, com o total de 3.650 kg de biomassa ha ano<sup>-1</sup>. No sistema com cevada, por ter aporte também no inverno, esse valor foi de 5.870 kg de biomassa ha ano<sup>-1</sup>. No sistema com aveia+nabo, o aporte anual médio de biomassa foi de 11.340 kg ha ano<sup>-1</sup>. Já o sistema milho/aveia+nabo, que é o tratamento com maior número de culturas, aportou 14.150 kg de biomassa ha ano<sup>-1</sup>. Comparando os extremos, o sistema milho/aveia+nabo aportou 365% a mais de matéria seca que o sistema em pousio.

Logo, os sistemas com uso mais intensivo de culturas, tem maior capacidade para reciclar nutrientes, aumentar ou manter os estoques de carbono e melhorar a estrutura do solo pelo desenvolvimento de raízes. Tal fato vai de encontro a sustentabilidade do sistema e manutenção de altas produtividades.

## **6.2. Segunda ação de pesquisa – Diagnóstico da compactação para tomada de decisão quanto a necessidade e forma de intervenção na descompactação.**

### **6.2.1. Valores críticos de densidade do solo para a região Centro-sul do Paraná**

Ao analisar as amostras coletadas, obtiveram-se teores de argila entre 23,8 e 75,7% e de matéria orgânica entre 1,57 e 5,15%. O ensaio de Proctor foi realizado para determinação da densidade máxima do solo em todas as amostras analisadas, a qual variou entre 1,10 e 1,59 Mg m<sup>-3</sup>. Após essas determinações foi realizada uma regressão linear a fim de relacionar os valores de densidade máxima com os valores de argila e de matéria orgânica. Posteriormente, arbitrou-se o valor de 90% da densidade máxima como o valor de densidade relativa crítica para os solos da região. Apesar de não ter encontrado valores limitantes de densidade no experimento de campo (encontrada apenas em ensaio de laboratório, aplicando 880 kPa de carga), definiu-se esse valor com base em trabalhos da literatura (MARCOLIN; KLEIN 2011; KLEIN; BASEGGIO; MADALOSSO, 2009; FERRERAS et al., 2001;

HAKANSSON; LIPIEC, 2000). A Equação 12 apresenta a densidade relativa crítica (90% da máxima para os solos da região estudada),

$$D_{\text{crit}} = 1,629 - (0,00363 * \text{Arg}) - (0,0916 * \text{Mo})$$

(Equação 12)

(R<sup>2</sup>= 0,912; p<0,001)

Onde: D<sub>crit</sub> é a densidade relativa crítica (90% em relação a densidade máxima);

Arg é o teor de argila do solo em %;

Mo é o teor de matéria orgânica do solo em %.

Afim de facilitar o uso da equação para na aplicação prática, foi elaborada uma tabela de densidade crítica, para auxiliar na tomada de decisão sobre o manejo da compactação (Tabela 28).

**Tabela 28:** Densidade crítica para tomada de decisão do manejo da compactação em solos da região Centro-Sul do Paraná.

Teor de argila (%)	Teor de matéria orgânica (%)		
	1,0 a 2,5	2,6 a 4,0	4,1 a 5,5
	-----Densidade crítica (Mg m <sup>-3</sup> )-----		
20 a 40	1,4	1,2	1,1
41 a 60	1,3	1,1	1,0
61 a 80	1,2	1,0	0,9

Nos solos estudados, o teor de matéria orgânica tem maior contribuição nos valores de densidade, quando comparado ao teor de argila. Ao realizar regressões lineares separadamente, o teor de argila gera uma equação com R<sup>2</sup> de 0,29, enquanto, o teor de matéria orgânica, um R<sup>2</sup> de 0,75, o que enfatiza, mais uma vez, a importância da matéria orgânica nos solos da região.

#### 6.2.2. Resiliência do solo

A análise de resiliência, levou como base os valores de densidade do solo. Estes valores, bem como a resiliência em si, estão apresentados na Tabela 29.

**Tabela 29:** Densidade do solo (Ds) inicial, após aplicação das cargas, após os quatro ciclos de umedecimento e secagem e resiliência do solo nos fatores estudados.

---- Variável ----		Ds inicial (Mg m <sup>-3</sup> )	Ds após a carga (Mg m <sup>-3</sup> )	Ds após os ciclos (Mg m <sup>-3</sup> )	Resiliência
Camada (m)	0,00 - 0,10	0,93 b	1,03 b	1,01 b	0,28 <sup>ns</sup>
	0,10 - 0,20	0,99 a	1,09 a	1,06 a	0,31 <sup>ns</sup>
Carga aplicada (kPa)	220	0,94 <sup>ns</sup>	1,01 c	0,98 c	0,43 a
	440	0,96 <sup>ns</sup>	1,05 b	1,03 b	0,26 b
	880	0,97 <sup>ns</sup>	1,12 a	1,10 a	0,20 b

Letras iguais na coluna indicam que não há diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, comparando as médias dentro de cada fator estudado. <sup>ns</sup>Não significativo pela análise de variância.

. Os valores de densidade relativa dos tratamentos estudados estão apresentados na Tabela 30.

**Tabela 30:** Densidade do solo relativa (DsR) inicial, após a aplicação das cargas e após os quatro ciclos de umedecimento e secagem.

---- Variável ----		DsR inicial (%)	DsR após a carga (%)	DsR após os ciclos (%)
Camada (m)	0,00 - 0,10	74	82	80
	0,10 - 0,20	79	86	84
Carga aplicada (kPa)	220	75	80	77
	440	76	83	82
	880	77	89	87

Neste solo, a densidade relativa crítica (90% da densidade máxima) é de  $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$ , portanto, na média a mesma não foi atingida, nem mesmo aplicando 880 kPa de pressão por um minuto na amostra

Aplicando-se 880 kPa de pressão, chegou-se à densidade relativa muito próxima da considerada crítica. No entanto, quatro ciclos de umedecimento e secagem já foram capazes de reduzir a densidade relativa. Este ensaio, mais uma vez mostra o importante papel da matéria orgânica na resistência do solo à deformações causadas por pressões aplicadas.

### 6.2.3. Prevenção da compactação

Pelo ensaio de Proctor, também se obtém o valor de umidade ótima para a compactação (UOC) em cada uma das amostras analisadas. Da mesma forma, os valores de UOC foram equacionados em função dos teores de argila e de matéria orgânica:

$$\text{UOC} = 0,0274 + (0,00298 * \text{Arg}) + (0,0588 * \text{Mo})$$

$$(\text{R}^2 = 0,901; \text{p} < 0,001)$$

(Equação 13)

Onde: UOC é a umidade ótima de compactação ( $\text{g g}^{-1}$ )

Arg é o teor de argila do solo em %;

Mo é o teor de matéria orgânica do solo em %.

**Tabela 31:** Umidade ótima de compactação, na qual deve-se evitar o tráfego de máquinas agrícolas em solos da região Centro-Sul do Paraná.

Teor de argila (%)	Teor de matéria orgânica (%)		
	1,0 a 2,5	2,6 a 4,0	4,1 a 5,5
	-----Umidade ótima de compactação (%)-----		
20 a 40	22	32	41
41 a 60	29	39	48
61 a 80	35	45	54

De forma geral, quanto menores os teores de argila e de matéria orgânica, menores os valores de umidade ótima de compactação, o que de certa forma pode prejudicar o manejo do solo nestas áreas com máquinas.

#### 6.2.4. Observações no manejo de solos compactados

O ideal é que o nível de compactação do solo seja diagnosticado antes de se tornar crítica, a ponto de impedir o crescimento radicular ou reduzir muito a infiltração de água no solo, causando reduções significativas na produtividade ou causando problemas de erosão devido ao escoamento superficial.

Ao se observar que a densidade esteja próxima do nível crítico, apresentado no item (6.2.5), preferencialmente opta-se por adotar um sistema de culturas mais intensificado, como por exemplo aveia+nabo no inverno ou até mesmo com o milho no pousio outonal, visto o potencial que as culturas têm de, em poucas safras, causarem melhorias na estrutura do solo. Se a densidade estiver bem próxima da crítica, principalmente em camadas superficiais (até 0,20 m), pode-se optar pelo uso da haste sulcadora no momento da semeadura das culturas, pois é uma prática barata e com potencial de melhorar o desenvolvimento das culturas bem como características do solo.

No momento do diagnóstico, se a densidade se encontra acima da considerada crítica, pode-se optar por escarificar o solo. No entanto alguns pontos devem ser observados e alguns cuidados tomados. O solo deve estar em condição friável no momento da escarificação, para permitir melhor mobilização do solo.

O equipamento deve ser regulado de forma que o espaçamento entre hastes seja entre 1 e 1,5 vezes a profundidade (em geral 1,3 vezes) que se deseja atuar, para garantir adequado revolvimento do solo entre as hastes (SPOOR; GODWIN, 1978).

Ao se optar por realizar uma escarificação, recomenda-se fazer também uma análise química do solo, para caso haja necessidade de calagem, realizá-la anteriormente à escarificação, pois conforme já apresentado por Buzzatti (2011), a escarificação incorpora de forma satisfatória o calcário.

Outro cuidado é de realizar a escarificação em época que as chuvas apresentem menor potencial erosivo, a fim de se evitar selamento superficial do solo, bem como perdas de solo por erosão, visto que o solo fica mais exposto após esta prática. Em solos com boa cobertura por resíduos ou plantas, uma escarificação adequada pode deixar mais de 60% da sua superfície coberta (LEVIEN, 1999). Na região, os meses com menor erosividade são os de março, abril, junho, julho e agosto (WALTRICK, 2010). Com o objetivo de proporcionar agregação biológica do solo, recomenda-se semear alguma cultura imediatamente após a escarificação. Neste trabalho, o milho foi utilizado logo após a escarificação, tendo sua produtividade afetada negativamente pela prática, possivelmente pela heterogeneidade na profundidade da semeadura devido a rugosidade superficial. Logo, preferencialmente após a escarificação deve-se usar uma cultura de cobertura. Fazendo-se isso, evita-se também tráfego excessivo na área, permitindo que com a própria chuva ocorra a reacomodação do solo. A entrada de máquinas logo após a escarificação pode causar irregularidades na superfície, conforme apresentado na Figura 68.



**Figura 68:** Irregularidade na superfície do solo causada pela passagem de pulverizador autopropelido em área escarificada.

Essa irregularidade causada pelo tráfego de alguma máquina pode causar problemas na semeadura das culturas, onde essa poderá não ser semeada a uma profundidade adequada, além de que no momento da colheita, plantas que ficam dentro desse rastro sejam colhidas a uma altura mais alta do que a recomendada, aumentando as perdas de colheita, principalmente na cultura da soja, onde os legumes estão inseridos até muito próximo da superfície do solo.

## 7. CONCLUSÕES

Os atributos do solo analisados (densidade, resistência à penetração e condutividade hidráulica saturada) foram sensíveis para detectar variações entre os sistemas de preparo, níveis de compactação e sistemas de cultura.

A produtividade de grãos de soja e cevada, a produtividade de biomassa de milho e de aveia+nabo, bem como de raízes de soja foram pouco afetadas pela compactação, sistemas de preparo e sistemas de culturas.

A cultura da soja, bem como a da cevada em 2018, apresentou as maiores produtividades na área escarificada que sofreu tráfego de rodados da semeadora.

O consórcio das culturas de aveia+nabo foi favorecido pela escarificação, produzindo maior biomassa nesses sistemas, em dois dos três anos estudados.

Os sistemas de cultura tenderam a causar alterações na densidade, resistência a penetração e infiltração de água no longo prazo, sendo mais expressivos na superfície do solo.

Ao longo do tempo, as variações causadas pela compactação e pela escarificação SÃO reduzidas, sendo pouco expressivas passados dois anos.

O uso da haste sulcadora em uma safra foi suficiente para melhorar parâmetros físicos e hídricos do solo até a camada de 0,20 m.

A escarificação em áreas sem altos níveis de compactação diminuiu a densidade do solo, no entanto não alterou a infiltração de água.

Com relação a segunda ação de pesquisa, foi encontrada uma relação significativa entre os teores de argila e matéria orgânica com os de

densidade máxima, podendo auxiliar produtores da região a diagnosticarem o nível de compactação do solo em suas áreas.

## 8. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12007**: ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT, 1990. 13 p.

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 3, p. 519–531, 2004.

ALMEIDA, W. S. *et al.* Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, n. 6, p. 130–138, 2018.

ANDRADE, J. G. **Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

ASABE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASAE S313.3**: soil cone penetrometer. St. Joseph: ASABE, 1999. 834 p.

BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; ELRICK, D. A. Simplified falling-head technique for rapid determination of field-saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 66-73, 2004.

BAYER, C. *et al.* A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1/2, p. 217-226, 2006.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 6, p. 581–588, 2004.

BEUTLER, A. N. *et al.* Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa,

MG, v. 29, n. 6, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, A. N. *et al.* Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 167-177, 2001.

BOHM, W. **Methods of studing root system**. Berlin: Springer, 1979. 188 p.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do sol por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, n. 1, p. 91-98, 1990.

BRAIDA, J. A. *et al.* Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 4, p. 605–614, 2006.

BULLARD, J. E. *et al.* Impact of multi-day rainfall events on surface roughness and physical crusting of very fine soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, n. July 2017, p. 181–192, 2018.

BUZZATTI, A. S. **Métodos de incorporação de calcário em um Latossolo vermelho sob plantio direto**. 2010. 73 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010.

CAMPOS, B. C. *et al.* Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 459-463, 1994.

CARVALHO, G. J. *et al.* Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 765–771, 2006.

CARTER, M. R.; BALL, B. Soil porosity. *In*: CARTER, M. R. **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. p. 581-588.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem**. Brasília, DF: PRONI/MA, 1988. 216 p.

CONTE, O. *et al.* Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 44, n. 10, p. 1254–1261, 2009.

CUNHA, J. P. B. *et al.* Demanda energética de diferentes manejos de solo no cultivo de milho. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 31, n. 3, p. 808-817, 2015.

CURI, N. *et al.* **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90 p.

DALLA ROSA, A. D. **Práticas mecânicas e culturas na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo - solo Santo Ângelo (Latosolo Roxo Distrófico)**. 1981. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon**. Dalmont: Paris, 1856.

DEBIASI, H. *et al.* Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, n. 6, p. 603–612, 2010.

DEJONG-HUGHES, J. M. *et al.* **Soil compaction: causes, effects and control**. St. Paul, MN: University of Minnesota Extension Service, 2001. 17 p.

DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 18, p. 33-34, 2008.

DRESCHER, M. S. *et al.* Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1713–1722, 2011.

DRESCHER, M. S. *et al.* Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em latossolo vermelho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1836-1844, 2012.

ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D. Methods for analyzing constant-head well permeameter data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1985–1988, 1992

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília DF: Embrapa, 2013. 353 p.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 507–514, 1999a.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 1, p. 515–524, 1999b.

- FERRERAS, L. A. *et al.* Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 1, p. 161-170, 2001.
- FIGUEIREDO, G. C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 163 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- FISH, A. N.; KOPPI, A. J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, n. 3/4, p. 255–264, 1994.
- FONTOURA, S. M. V. *et al.* **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto do Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. v. 1. 146 p.
- FREDDI, O. S. *et al.* Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 113-121, 2006.
- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 2, p. 71-85, 2000.
- HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 105-120, 1990.
- HAKANSSON, I.; VOORHEES, W. R.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n. 3/4, p. 239-282, 1988.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.
- HERRICK, J. E.; WANDER, M. M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition and soil biological activity. *In*: LAL, R. *et al.* (ed.). **Soil processes and carbon cycle: advances in soil science**. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 405-426.
- HILLEL, D. **Solo e água: fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: UFRGS, 1970. 231 p.
- HOLTHUSEN, D. *et al.* Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 177, n. November 2017, p. 113–124, 2018.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An Introduction of geotechnical engineering**, New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1981. 733 p.

HORN, R. Compressibility of arable land. *In*: DRESCHER, J.; HORN, R.; BOODT, M. (ed.). **Impact of water and external forces on soil structure: selected papers of the 1st Workshop on Soilphysics and Soilmechanics**, Hannover 1986. Cremlingen-Destedt: Catena, 1988. (Catena Supplement, v. 1). p. 53-71.

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

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. **Censo Agropecuário 2017**: tabela 6640: número de estabelecimentos agropecuários, sistema de preparo do solo e área com plantio direto na palha - resultados preliminares 2017. [Rio de Janeiro]: IBGE, 2017.

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

KELLER, T. *et al.* SoilFlex-LLWR: linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. **Soil Use and Management**, Wallingford, v. 31, n. 2, p. 321–329, 2015.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, 2009.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 221–227, 2007.

KLEIN, V. A. *et al.* Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, New Brunswick, v. 165, n. 1, p. 57-72, 2000.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, Boca Raton, v. 1, p. 277-294, 1985.

LEVIEN, R. **Condições de cobertura e métodos de preparo do solo para a implantação da cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 305 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

LEVIEN, R. *et al.* Semeadura direta de milho com dois tipos de sulcadores de adubo, em nível e no sentido do declive do terreno. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 6, p. 1003–1010, 2011.

LIMA, H. V. *et al.* Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 677–684, 2005.

LIMA, R. P. *et al.* Soilphysics: an R package for calculating soil water availability to plants by different soil physical indices. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 120, n. January, p. 63–71, 2016.

LIMA, R. P. *et al.* Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 162, p. 1–10, 2017.

LOPES, E. L. **Efeito da compactação do solo no desenvolvimento de nabo forrageiro e sua ação como descompactador biológico**. 2017. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2017.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. 3. ed. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002. 438 p.

MACHADO, L. A. Z.; ASSIS, P. G. G. Produção de palha e forragem por espécies anuais e perenes em sucessão à soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, p. 415-422, 2010.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MARSILI, A. *et al.* Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber – and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 2, p. 185-199, 1998.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. v. 2.

MCKEYS, E. **Soil cutting and tillage**. New York: Elsevier Science, 1985. v. 7.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Soil compaction and water management. I: effects upon uptake of N, P, K, root and shoot dry matter of rice plants. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 940–947, 2005.

MENEZES, K. C.; PUIA, J. D.; MACHADO, A. H. R. A importância da elasticidade da matéria orgânica e de sua atuação na estabilidade dos agregados para o controle da compactação do solo. **Brazilian Journal of**

- Animal and Environmental Research**, Curitiba, v. 3, n. 3, p. 1349-1356, 2020.
- MORAES, M. T. *et al.* Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 88-98, 2014.
- MORAES, M. T. *et al.* Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 6, p. 1704-1713, 2012.
- MORIN, J.; VAN WINKEL, J. The effect of raindrop impact and sheet erosion on infiltration rate and crust formation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 4, p. 1223-1227, 1996.
- MUNKHOLM, L. J.; SCHJØNNING, P.; KAY, B. D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, n. 1/2, p. 125-135, 2002.
- NICOLOSO, R. S. *et al.* Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1723-1734, 2008.
- NITSCHKE, P. R. *et al.* **Atlas climático do Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 2019.
- NUNES, M. R. *et al.* Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 2, p. 627-638, 2014.
- NUNES, M. R. *et al.* Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 148, p. 119-126, 2015.
- OADES, J. M. The role of biology in the formation, stabilization and aggregation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v. 56, p. 377-400, 1993.
- PANACHUKI, E. *et al.* Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 1, p. 1777-1785, 2011.
- PANAYIOTOPOULOS, K. P.; PAPADOPOULOU, C. P.; HATJIIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 4, p. 323-337, 1994.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais.

**Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 3, p. 911-920, 2008.

PEIXOTO, D. S. *et al.* A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 94, n. 11, p. 104-115, 2019.

PIERRI, L. *et al.* Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 63, n. 2, p. 129-137, 2016.

PÖHLITZ, J. *et al.* Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 175, n. 5, p. 205-216, 2018.

PRADO, R. M.; ROQUE, C. M.; SOUZA, Z. M. Sistemas de preparo e resistência a penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 12, p. 1795-1801, 2002.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo**: com problemas resolvidos. 2. ed. rev. e ampl. Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474 p.

REICHERT, J. M. *et al.* Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage? **Geoderma**, Amsterdam, v. 301, p. 72-79, 2017.

REICHERT, J. M. *et al.* Mechanized land preparation in eastern Amazon in fire-free forest-based fallow systems as alternatives to slash-and-burn practices: Hydraulic and mechanical soil properties. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 47-60, 2014.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; CABEDA, M. S. V. Selamento Superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 16, n. 3, p. 289-298, 1992.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Hydraulic conductivity of saturated soils, constant head method. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C. (ed.). **Methods of soil analyses**. Part 4: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. (Book Series, v. 5). p. 694-700.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSA, J. D. *et al.* Processo de formação de crostas superficiais em razão de sistemas de preparo do solo e chuva simulada. **Revista Brasileira de**

**Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 2, p. 400-410, 2013.

ROSEBERG, R. J.; MCCOY, E. L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p. 969–974, 1990.

SANTOS, K. S. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 16, n. 8, p. 828–835, 2012.

SCANLON, B. R.; ANDRASKI, B. J.; BILSKIE, J. Water potential: miscellaneous methods for measuring matric or water potential. *In*: DANE, J. H.; TOPP, C. (ed.). **Methods of soil analysis**. Part 4: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 643-670.

SCHERPINSKI, C. *et al.* Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

SCHJØNNING, P. *et al.* Driver–pressure–state–impact–response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction: a European perspective. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 133, p. 183-237, 2015.

SECCO, D. *et al.* Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004

SEKI, A. S. *et al.* Effects of soil decompaction techniques in an area under a system of direct seeding. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 3, p. 460–468, 2015.

SEQUINATTO, L. *et al.* Qualidade de um Argissolo submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 344-350, 2014.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 921–930, 2006.

SILVA, A. P. *et al.* Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 1535–1545, 2009.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 10, n. 1, p. 91-95, 1986.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa**

**Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 32, n. 2, p. 213–220, 1997.

SILVA, P. R. A. **Mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora na cultura do milho (*Zea mays* L.) no sistema de plantio direto**. 2003. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2003.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 6, p. 855–860, 2002.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 842-847, 2006.

SILVA, T. S. **Organização da estrutura do solo em função de sistemas de preparo e de culturas**. 2020. 115 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

SILVA, T. S. *et al.* Soil pore characteristics and gas transport properties of a no-tillage system in a subtropical climate. **Geoderma**, Amsterdam v. 401, n. 6, p. 115-125, 2021.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 795–801, 2000.

SINGH, J.; HADDA, M. S. Soil and plant response to subsoil compaction and slope steepness under semi-arid irrigated condition. **International Journal of Food, Agriculture & Veterinary Sciences**, Jaipur, v. 4, n. 3, p. 95-104, 2014.

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

SPOOR, G.; GODWIN, R. J. An experimental investigation in the dup haseming of by rigid times. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 23, n. 1, p. 243-58, 1978.

STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 185, n. 3, p. 151-162, 1996.

STRECK, C. A. *et al.* Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755–760, 2004.

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

TANG, A. M. *et al.* A study on the air permeability as affected by compression of three French soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 162, n. 1/2, p. 171–181, 2011.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise do solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 573 p.

TORMENA, C. A. *et al.* Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795–801, 2002.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja, Circular técnica, 23).

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

VOGELER, I. *et al.* Soil assessment of apple orchards under conventional and organic management. **Australian Journal of Soil Research**, Clayton, v. 44, n. 8, p. 745–752, 2006.

WALTRICK, P. C. **Erosividade de chuvas no Paraná: atualização, influência do “El niño” e “La niña” e estimativa para cenários climáticos futuros**. 2010. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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