UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Tiago De Gregori Teixeira

ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO, SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB TRÁFEGO CONTROLADO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL

Santa Maria, RS
2018

Tiago De Gregori Teixeira

Atributos físicos de um Latossolo, sistema radicular e produtividade da soja sob tráfego controlado em plantio direto no sul do Brasil

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS
2018

Teixeira, Tiago De Gregori
Atributos físicos de um Latossolo, sistema radicular e produtividade da soja sob tráfego controlado em plantio direto no sul do Brasil / Tiago De Gregori Teixeira.- 2018.
147 p.; 30 cm

Orientador: Telmo Jorge Carneiro Amado
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2018

1. Compactação do solo 2. Tráfego tradicional 3. Distribuição vertical de raízes 4. Tráfego alternado anual 5. Deslocamento de linhas de tráfego I. Amado, Telmo Jorge Carneiro II. Título.

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

© 2018.
Todos os direitos autorais reservados a Tiago De Gregori Teixeira. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.
Endereço: Rua Araújo Viana, 270. Camobi, Santa Maria – RS.
E-mail: t18t@hotmail.com / tiagod.teixeira@gmail.com

Tiago De Gregori Teixeira

ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO, SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB TRÁFEGO CONTROLADO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Aprovado em 24 de setembro de 2018:

Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Eduardo Leonel Bottega, Dr. (UFSM)

Geovane Boschmann Reimche, Dr.

Otávio dos Anjos Leal, Dr. (IFC)

Vitor Cauduro Girardello, Dr. (URI)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

À universidade Federal de Santa Maria por oportunizar a formação profissional na instituição desde o curso técnico ao doutorado. Foi minha segunda casa, entre os anos de 2005 à 2018.

Aos órgãos de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de auxílio, e a Fundação Agrisus pelo financiamento das atividades de campo através do projeto PA 2199/17 “Tráfego controlado agrícola no Sul do Brasil”.

Ao Centro de Ciências rurais, e ao departamento de solos pela estrutura física que nos é disponibilizada. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, aos professores, ao secretário do PPGCS Heverton Heinz, e aos funcionários do galpão de solos.

Ao produtor Marcos Souilljee e ao Paulo Pires prestador de serviço e AP, e aos funcionários da propriedade sempre muito solícitos em ajudar nas atividades e contribuindo para a realização do trabalho.

A Banca examinadora pelas contribuições.

Ao professor Telmo J. C. Amado que além da orientação do trabalho, a amizade de longa data, obrigado pelas orientações constantes na universidade e viagens de acompanhamento das pesquisas. Sempre acompanhado de um bom chimarrão!

Aos amigos e ex-integrantes Projeto Aquarius e Laboratório de Uso e Manejo do solo que de alguma forma contribuíram com minha formação e para o sucesso desse trabalho.

Aos colegas e amigos de laboratório: Emanuel, Geovane, Raí, Mazuco, Darlan Keller, Marci, Vini, Otávio, Artur, Enza, DJ, Bolsistão, Liska, Maninha, Fábio, Luan, Carlos, Geomar, Eduardo, Gilvan, Douglas, Cristian, Maranhão pelas contribuições permanentes nas atividades a campo, em laboratório e também nos momentos de descontração, vocês foram muito importantes para realização desse trabalho:

Aos meus amigos que de alguma forma contribuíram com o trabalho. E ao meu time do coração, o Grêmio, que trouxe momentos alegrias e descontração, vamos tricolor!

A minha família, tios, tias, primos, primas meus sogros e meu cunhado pelos momentos de descontração quando temos a oportunidade de estarmos juntos. E um agradecimento especial dos meus avós Maneco e Zahir, Azair e Lúcia.

A minha mãe Jussara por ser um exemplo de pessoa batalhadora, e um exemplo de professora dedicada à sua profissão. E ao meu irmão Guilherme, onde vocês sempre me incentivaram para continuar, sempre em frente, estudar e me qualificar.

A minha namorada Anaqueli por estar ao meu lado, me apoiando e incentivando nos desafios do dia a dia, e por compartilharmos nossos momentos difíceis e de alegrias.

Muito obrigado.

RESUMO

ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO, SISTEMA RADICULAR E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB TRÁFEGO CONTROLADO EM PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL

AUTOR: Tiago De Gregori Teixeira
ORIENTADOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

A compactação do solo ocorre em virtude das passadas desordenadas de máquinas verificadas no tráfego tradicional. O planejamento das linhas de tráfego e ajustes de largura de trabalho e bitola de máquinas agrícolas permitem a adoção do tráfego controlado. Esse tipo de tráfego visa concentrar a compactação nos mesmos locais em todas as atividades agrícolas, buscando manter os locais sem tráfego em condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas. O objetivo desse trabalho foi analisar os atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, o comprimento do sistema radicular e produtividade das culturas soja e aveia submetidas a diferentes tipos de tráfego agrícola sob plantio direto (PD). O estudo foi conduzido em uma área comercial de 89 ha no município de Carazinho, RS, manejada sob PD por aproximadamente 20 anos. Os tratamentos foram constituídos pelos tipos de tráfego: tradicional (TT), controlado (TC) e alternado anual (TAA). Para intensidades de tráfego os seguintes tratamentos foram adotados: máximo (Tma), máximo há um ano (Tma1), máximo há dois anos (Tma2), médio (Tme), médio há um ano (Tme1), médio há dois anos (Tme2) e sem tráfego (ST). Este estudo apresenta na primeira parte, as alterações nas propriedades físico-hídricas do solo e produtividade da cultura da soja e aveia. Foram avaliados a densidade (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT) em 4 épocas, resistência a penetração do solo (RP) em 7 épocas, taxa de infiltração de água no solo em 2 épocas, 3 safras de soja e 1 de aveia, entre 2015 e 2018. Na segunda parte do trabalho, foi analisada a relação das intensidades de tráfego com o desenvolvimento radicular e produtividade da cultura da soja na safra 2017/18. No terceiro trabalho os resultados do primeiro e segundo trabalhos foram relativizados para hectare, e avaliados para cada tipo de tráfego, bem como a lucratividade e o retorno econômico. No primeiro estudo foram constatados redução da DS e aumento da Macro na superfície do solo, a infiltração acumulada foi incrementada nos locais sem tráfego dos tratamentos TC e TAA. A produtividade da soja safra 2016/17 foi incrementada na nos tratamentos ST, Tme1 e Tma1, para a aveia o tratamento mais produtivo foi TAA ST. No segundo estudo o efeito dos sulcadores sob as antigas linhas de tráfego foi temporário, não sendo percebido após dois anos do deslocamento das linhas de tráfego. Não houve diferença significativa para os resultados de comprimento radicular, ocorrendo o mesmo para produtividade de soja. Para o terceiro estudo foi verificado o incremento produtivo acumulado para os tráfegos TC e TAA, bem como a maior rentabilidade e o menor tempo para o retorno do investimento no tratamento TC. Assim, verifica-se que TAA deve ser avaliado por período mais longo a fim de determinar o quão benéfico é ao solo as mudanças planejadas das linhas de tráfego. E conclui-se que a adoção do TC proporciona melhoras na estrutura física do solo, aumenta a infiltração acumulada e propicia lucratividade e incremento produtivo.

Palavras-chave: Compactação do solo. Tráfego tradicional. Tráfego alternado anual. Deslocamento de linhas de tráfego. Distribuição vertical de raízes.

ABSTRACT

PHYSICAL ATTRIBUTES OF A TYPIC HAPLUDOX, ROOT SYSTEM AND SOYBEAN SEED YIELD UNDER CONTROLLED TRAFFIC FARMING IN NO-TILLAGE SYSTEM IN SOUTHERN BRAZIL

AUTHOR: Tiago De Gregori Teixeira
ADVISOR: Telmo Jorge Carneiro Amado

Soil compaction occurs due to the disorderly passages of machines verified in traditional traffic. Matching traffic lines, working width and gauge of agricultural machinery allow the adoption of controlled traffic farming. This type of traffic aims to concentrate the compaction in the same places in all agricultural activities, seeking to keep the places without traffic in favorable conditions to the development of plants. The objective of this study was to analyze: physical attributes of a typic Hapludox soil, root system length, and soybean and oat yields, subjected to different types of agricultural traffic under a no-tillage system (NT). The study was conducted in a 89 ha field (on-farm research), in the municipality of Carazinho, RS, managed under NT over the last 20 years. Two sources of variation were investigated, traffic types and intensities. For traffic types the levels were: traditional traffic (TT), controlled traffic (CTF) and annual alternate traffic (AAT). For traffic intensities the levels were: maximum traffic (Tma), maximum traffic one year ago (Tma1), maximum traffic two years ago (Tma2), medium traffic (Tme), medium traffic one year ago (Tme1), medium traffic two years ago (Tme2) and without traffic (WT). This study firstly presented changes in the soil physicohydraulic parameters and its association with and soybean seed yield and oat aboveground dry mass production (ADMP). Evaluations were performed for soil bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity at four times; penetration resistance at seven times; soil water infiltration rate at twice. Soybean seed yield was evaluated during three growing seasons, from 2015 to 2018, and oat ADMP in 2017. As a second section, it was explored the relationship between the traffic intensities, root development and soybean seed yield in the 2017/18 growing season. Lastly, the results of the first and second studies were standardized to a hectare base, and they were evaluated dependently for each type of traffic, as well as the profitability and payback. In the first study were observed, soil bulk density reductions and macroporosity increases in the soil surface. The accumulated infiltration increased in the places without traffic for CTF and AAT treatments. Soybean seed yield in the 2016/17 growing season increased in the treatments WT, Tme1 and Tma1. The most productive ADMP oat treatments was AAT WT. In the second study the effect of the shanks under the old traffic lines was temporary, not being perceived after two years of the displacement of the traffic lines. There was no significant difference for root length and for soybean seed yield. For the third study was verified an increase in the accumulated yield for the CTF and AAT traffics, while the highest profitability and the shortest time for the payback was observed in the CTF treatment. Thus, it was verified that AAT should be evaluated for a longer period in order to determine the beneficial of performing traffic lines planned changes in the soil. In summary. The adoption of CTF provided improvements in the physical structure of the soil, increased the accumulated infiltration and the profitability promoting a productive increment.

Keywords: Soil compaction. Traditional traffic. Annual alternate traffic. Displacement of traffic lines. Vertical distribution of roots.

LISTA DE FIGURAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Figura 1. Localização do município de Carazinho no estado do Rio Grande do Sul, e a definição das linhas planejadas de tráfego dos implementos. 28

Figura 2. Maquete conceitual da agricultura de precisão apresentada no APSul América 2013, linhas de tráfego planejada, localização dos blocos de avaliação no campo e disposição dos equipamentos nas linhas de tráfego. 31

Figura 3. Detalhes da semeadura e semeadora utilizados na cultura da soja e aveia. 33

Figura 4. Trator, pulverizador, reboque e colhedora adaptados para o tráfego controlado.....35

Figura 5. Deslocamento das linhas do tráfego alternado anual para as três safras avalias. 38

Figura 6. Linha do tempo das atividades realizadas a campo.....40

Figura 7. Abertura das trincheiras (A), coleta de solo com anéis volumétricos (B), avaliação do solo na coluna de areia. 42

Figura 8. Detalhes e dimensões dos duplos anéis (A), e imagem do infiltrômetro em avaliação a campo (B).....43

Figura 9. Representação da coleta de anéis volumétricos estratificados e avaliação da resistência mecânica a penetração do solo.....44

Figura 10. Tábua de pregos(A), abertura das trincheiras para coleta (B) e método de transporte do monolito (C).....46

Figura 11. Lavagem (A) e análise e escaneamento no software WinRhizo (B), e imagem de parte do sistema radicular da soja (C). 47

ARTIGO 1

Figura 1. Linha do tempo das atividades realizadas, precipitação diária e acumulada no período de 28 meses. Referente a três ciclos da cultura da soja e aveia. 56

Figura 2. Disposição a campo do deslocamento dos implementos e das linhas de tráfegos. 59

Figura 3. Avaliação da resistência mecânica a penetração (RP) em diferentes épocas de avaliação para as intensidades de tráfego. Os registros foram relativizados para a média de cada avaliação.....68

Figura 4. Avaliação da Velocidade infiltração instantânea de água (VI).....76

Figura 5. Avaliação da infiltração acumulada de água (I).....77

Figura 6. Análise discriminante de componentes principais para produtividade da soja nas safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18. 79

Figura 7. Avaliação da produtividade da cultura da soja e a produção de matéria seca da aveia. Safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18 cultura da soja, ano de 2017 cultura de cobertura da Aveia. 81

ARTIGO 2

Figura 1. Esquema do deslocamento das linhas para os três tipos de tráfego. 96

Figura 2. Precipitação diária e acumulada no período de 140 dias, referente ao ciclo da cultura da soja entre os meses 25 e 29. Os meses que foram realizadas as avaliações e coletas identificadas a partir da data de implantação do TC: semeadura da soja (A), RP e coleta de Raízes (B), colheita Manual (C); colheita Mecânica (D); coleta de anéis volumétricos e análise de resistência a penetração do solo (E). 99

Figura 3. Resistência a penetração do solo em função do tipo e intensidade de tráfego e profundidade avaliada no período do florescimento e pós colheita da soja. 102

Figura 4. Analise de redundância (RDA) realizada para os dados de resistência a penetração RP (resistência a penetração), DS (densidade do solo), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade) e PT (porosidade total), comprimento radicular, e produtividade da cultura da soja para as camadas 0 – 0,05, 0,05 – 0,10, 0,10 – 0,15, 0,15 – 0,20 m. 114

Figura 5. Produtividade de soja safra 2017/18 para tipo de tráfegos e interação tráfego intensidade. 116

ARTIGO 3

Figura 1. Resistência a penetração do solo nos diferentes tipos tráfego após 14 meses da adoção do tráfego controlado. 130

Figura 2. Resistência a penetração realizada após 16, 20, 23, 24, 26 e 28 meses após a adoção do tráfego controlado. 131

Figura 3. Anéis volumétricos para determinação da densidade (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) do solo para as avaliações aos 3, 14 e 28 meses..... 133

Figura 4. Avaliação da Velocidade infiltração instantânea (VI), e infiltração acumulada de água (I). 135

Figura 5. Avaliação do comprimento raízes de soja safra 2017/18 nas classes de diâmetro R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm) e RT (total) para interação tráfego X camada. 136

Figura 6. Avaliação da produtividade da cultura da soja e a produção de matéria seca da aveia. Safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18 cultura da soja, e safra de 2017 para aveia como cultura de cobertura. 137

Figura 7. Produtividade média da cultura da soja para as safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18. 138

LISTA DE TABELAS

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Tabela 1. Atributos químicos e físicos avaliados no período de florescimento da soja. Carazinho-RS, 2018. 29

Tabela 2. Camadas de solo avaliadas. 40

ARTIGO 1

Tabela 1. Atributos químicos e físicos avaliados no período de florescimento da soja. Carazinho-RS. 55

Tabela 2. Resumo ANOVA. Valores de Fisher (F) e níveis de significância (*P*) para intensidade de tráfego, camada e interação entre tráfego x camada para resistência a penetração mecânica do solo, anéis volumétricos, infiltração, e produtividade. 63

Tabela 3. Média da resistência a penetração do solo (RP) para cada avaliação realizada. 64

Tabela 4. Avaliações de resistência a penetração do solo nas diferentes intensidades de tráfego. 65

Tabela 5. Densidade do solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas. 70

Tabela 6. Macroporosidade do solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas. 71

Tabela 7. Microporosidade solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas. 72

Tabela 8. Porosidade total solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas. 73

ARTIGO 2

Tabela 1. Granulometria do Latossolo da área experimental a camada de 0 a 0,40m em Carazinho-RS. 94

Tabela 2. Número total de passadas dos implementos em cada tratamento após 28 meses de adoção do tráfego controlado. 96

Tabela 3. Resumo ANOVA – comprimento de raízes total (RT) e nas classes de diâmetro R1, R2 e R3, resistência do solo a penetração (RP), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) e porosidade total (PT). Valores de Fisher (F) e níveis de significância (*P*) para os fatores: Tráfego, intensidade, tráfego intensidade, camada, tráfego X camada, intensidade X camada e tráfego intensidade X camada. 100

Tabela 4. Avaliações de resistência a penetração no florescimento e pós colheita, anéis volumétricos para avaliação de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo para os fatores tráfego, intensidade, camada, intensidade de tráfego, e trafego x camada. 104

Tabela 5. Avaliações de resistência a penetração no florescimento e pós colheita, anéis volumétricos para avaliação de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo para os fatores intensidade de tráfego x camada. 106

Tabela 6. Comprimento total das raízes (RT) de soja e comprimento radicular nas classificados nas classes de diâmetro R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm) para os fatores tráfego, intensidade, camada, intensidade de tráfego, e trafego x camada. 108

Tabela 7. Comprimento total das raízes (RT) de soja e comprimento radicular nas classificados nas classes de diâmetro R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm) para a interação dos fatores intensidade de tráfego x camada. 112

ARTIGO 3

Tabela 1. Porcentagem das intensidades de tráfego determinada pela largura do maior pneu utilizado durante as intervenções de semeaduras, pulverizações e colheitas. 127

Tabela 2. Resumo ANOVA – Sistema de tráfego. Valores de Fisher (F) e níveis de significância (*P*) para intensidade de tráfego, camada e interação entre tráfego x camada para resistência a penetração mecânica do solo, anéis volumétricos, e produtividades. 129

Tabela 3. Valores de receita e rentabilidade acumulados para as três safras, investimentos em adaptação, e aquisição de ferramentas para adoção do tráfego controlado, e retorno do investimento..... 139

LISTA DE EQUAÇÕES

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Equação 1. Velocidade infiltração instantânea (mm h^{-1})*: 42
Equação 2. Infiltração acumulada (mm)*: 43
Equação 3. Área trafegada TT Tma (%). 49
Equação 4. Área trafegada TC Tma (%). 49
Equação 5. Área trafegada TC Tme (%). 49
Equação 6. Área não trafegada TC ST (%). 49
Equação 7. Área trafegada* TAA Tma (%). 49
Equação 8. Área trafegada** TAA Tme (%). 49
Equação 9. Área não trafegada TAA ST (%) safras 2016 e 2016/17. 49
Equação 10. Área não trafegada TAA ST (%) safras 2017 e 2017/18. 49

ARTIGO 1

Equação 1. Velocidade infiltração instantânea (mm h^{-1})*: 73
Equação 2. Infiltração acumulada (mm)*: 73
Equação 3. Inicial (VI). 73
Equação 4. TC ST (VI). 74
Equação 5. TC Tme (VI). 74
Equação 6. TC Tma (VI). 74
Equação 7. TAA ST (VI). 74
Equação 8. TAA Tme (VI). 74
Equação 9. TAA Tme1 (VI). 74
Equação 10. TAA Tme2 (VI). 74
Equação 11. TAA Tma (VI). 74
Equação 12 TAA Tma1 (VI). 74
Equação 13TAA Tma2 (VI). 74
Equação 14. TT ST (VI). 74
Equação 15. TT ST (VI). 74
Equação 16 Inicial (I). 74
Equação 17 TC ST (I). 74
Equação 18 TC Tme (I). 74
Equação 19 TC Tma (I). 74
Equação 20 TAA ST (I). 75

Equação 21 TAA Tme (I). 75
Equação 22 TAA Tme1 (I). 75
Equação 23 TAA Tme2 (I). 75
Equação 24 TAA Tma (I). 75
Equação 25 TAA Tma1 (I). 75
Equação 26 TAA Tma2 (I). 75
Equação 27 TT ST (I). 75
Equação 28 TT Tma (I). 75

ARTIGO 3

Equação 1. Tráfego controlado (TC) 126
Equação 2. Tráfego alternado anual (TAA) 126
Equação 3. Tráfego tradicional (TT) 126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

"	Polegada
°C	Temperatura - escala grau celsius
Al	Alumínio
Ca	Cálcio
CQFS	Comissão de Química e Fertilidade do Solo
CTF	Controlled Traffic Farming
CV	Cavalo vapor
dpi	Dots per inch
DS	Densidade do solo
F	Fisher
FAO	Food and Agriculture Organization
GNSS	Global Navigation Satellite System
h	Horas
ha	Hectare
I	Infiltração acumulada
KCl	Cloreto de potássio
Kg	Quilograma
kPa	Kilopascal
kW	Quilowatt
m	Metro
m²	Metro quadrado (área)
Macro	Macroporosidade do solo
MAP	Mono amônio fosfato
Mg	Magnésio
Micro	Microporosidade do solo
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
P	Fósforo
P	Nível de significância
PD	Plantio direto
PT	Porosidade total do solo
RP	Resistência à penetração do solo
RS	Rio Grande do Sul
RTX	Real Time eXtended
SC	Santa Catarina
SPD	Sistema Plantio direto
ST	Sem tráfego
TAA	Tráfego alternado anual
TC	Tráfego controlado
Tma	Tráfego máximo
Tma1	Local onde foi tráfego máximo há um ano
Tma2	Local onde foi tráfego máximo há dois anos
Tme	Tráfego médio
Tme1	Local onde foi tráfego médio há um ano
Tme2	Local onde foi tráfego médio há dois anos
TT	Tráfego tradicional
UTM	Universal Transverse Mercator
VI	Infiltração instantânea
WRB	World Reference Base

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL 25
2. HIPÓTESES 27
3. OBJETIVOS 27
3.1 OBJETIVO GERAL 27
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS 27
4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL 28
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 28
4.2 ADOÇÃO DO TRÁFEGO CONTROLADO 29
4.3 ADAPTAÇÃO DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS 32
4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 36
4.5 DESCRIÇÃO DOS TRATAMENTOS 36
4.5.1 Tráfego tradicional (TT) 36
4.5.2 Tráfego controlado (TC) 37
4.5.3 Tráfego alternado anual (TAA) 37
4.6 DESCRIÇÃO DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS 40
4.6.1 Amostras de solo indeformadas para avaliação de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total 41
4.6.2 Avaliações de infiltração de água no solo 42
4.6.3 Avaliação da resistência mecânica a penetração do solo 43
4.6.4 Análises químicas e físicas do solo 44
4.6.5 Avaliação do sistema radicular 45
4.6.6 Avaliação da produtividade 48
4.6.7 Registros pluviométricos 48
4.6.8 Avaliação da área trafegada 48
4.6.9 Análise econômica 49
5. ESTATÍSTICA 50
6. ARTIGO 1 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO E A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE TRÁFEGO AGRÍCOLA 51
6.1 RESUMO 51
6.2 ABSTRACT 51
6.3 INTRODUÇÃO 52
6.4 MATERIAL E MÉTODOS 54
6.4.1 Local 54
6.4.2 Equipamentos utilizados 56
6.4.3 Desenho experimental e tratamentos 58

6.4.4 Avaliações a campo e análises laboratoriais 59
6.4.5 Estatística 61
6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 62
6.5.1 Resistência mecânica do solo a penetração (RP) 64
6.5.2 Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo 69
6.5.3 Infiltração de água no solo 73
6.5.4 Análise discriminante de Componentes Principais (ADCP) 78
6.5.5 Produtividade das culturas 80
6.6 CONCLUSÕES 83
6.7 REFERÊNCIAS 83
7. ARTIGO 2. INTERFERÊNCIA DO TIPO E DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO DE MÁQUINAS SOBRE O SOLO, AS RAÍZES E A PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PLANTIO DIRETO 89
7.1 RESUMO 89
7.2 ABSTRACT 89
7.3 INTRODUÇÃO 90
7.4 MATERIAL E MÉTODOS 93
7.4.1 Localização do experimento e descrição do maquinário 93
7.4.2 Desenho Experimental e Tratamentos 95
7.4.3 Tratos culturais Amostragem de planta, e solo e análises laboratoriais 97
7.4.4 Análise estatística 99
7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 100
7.5.1 Características físicas do solo 100
7.5.2 Avaliação do sistema radicular da soja 107
7.5.3 Avaliação da produtividade 115
7.6 CONCLUSÕES 116
7.7 REFERÊNCIAS 117
8. ARTIGO 3 – AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS, PRODUTIVIDADE DE AVEIA E SOJA, DESENVOLVIMENTO RADICULAR SUBMETIDOS A TRÊS TIPOS DE TRÁFEGO 123
8.1 RESUMO 123
8.2 ABSTRACT 123
8.3 INTRODUÇÃO 124
8.4 MATERIAL E MÉTODOS 126
8.4.1 Relativização dos dados 126
8.4.2 Análise econômica 127
8.4.3 Estatística 128
8.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 128

8.5.1 Resistência mecânica do solo a penetração (RP) 129
8.5.2 Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo 131
8.5.3 Infiltração de água no solo 134
8.5.4 Avaliação do sistema radicular 135
8.5.5 Produtividade das culturas 136
8.5.6 Análise econômica 138
8.6 CONCLUSÕES 140
8.7 REFERÊNCIAS 140
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS 145
10. REFERÊNCIAS 146

1. INTRODUÇÃO GERAL

A intensificação de processos que ocorre em todos os meios que a população tem acesso, como na agricultura, faz com que algumas ações e ferramentas necessitem devido cuidado ao serem estabelecidas para o meio ambiente ser mantido e conservado. O agricultor representa um papel fundamental na conservação dos solos, pois ele é o elo entre a produção de alimentos e as pessoas que realizam atividades em outros ramos. O manejo diário adotado por décadas de trabalho, produzindo alimentos e tirando seu sustento, nem sempre é a melhor técnica para a conservação e preservação dos recursos para gerações futuras.

Na década de 70, a agricultura brasileira passava por grandes problemas e o sistema tradicional de revolver, arar e gradear o solo não era o mais adequado. Toneladas de solo eram perdidas a cada precipitação. Esse sistema era indicado para países de clima frio e com precipitações de baixa intensidade. Nessa mesma década, agricultores do estado do Paraná liderados por Herbert Bartz iniciaram a implementação do Plantio Direto (PD). Tratava-se de um sistema, inovador para época, que preservava a estrutura do solo, fazendo com que os processos erosivos fossem minimizados.

Atualmente, cerca de 50 anos após o início do PD, foram desenvolvidos novos conceitos como o Sistema Plantio Direto (SPD), que vai além de apenas uma semeadura direta. O SPD visa também rotação de culturas, cobertura permanente e essas técnicas, manejos, equipamentos e cultivares já estão amplamente difundidas. A partir das demandas dos produtores e necessidades ambientais, as pesquisas sobre esse sistema de manejo avançam fazendo com que novas ferramentas sejam adotadas, tornando-o um sistema mais produtivo, lucrativo e ambientalmente sustentável. Mesmo assim, ainda são relatadas necessidades de melhorias do PD em alguns pontos como por exemplo, a compactação proveniente do tráfego aleatório das máquinas, principalmente devido à elevação do peso e das entradas na lavoura em dias de umidades inadequadas. A possibilidade, na atualidade, de ocorrer o alívio do peso do maquinário é algo improvável. Por isso, a concentração da compactação em faixas é uma das alternativas, mantendo assim o restante da superfície sem compactação.

Uma das alternativas apontadas para a redução da compactação é conhecida como Tráfego Controlado (TC) e mundialmente como “Controlled Traffic Farming”

(CTF), através das quais, busca-se, por meio de um “Global Navigation Satellite System” (GNSS) de alta precisão, manter as máquinas em linhas de tráfego permanentes. Quando os equipamentos possuem larguras de trabalho múltiplas e bitolas semelhantes, a área do solo que recebe o contato com os pneus fica reduzida, podendo facilmente ter apenas 12% da área influenciada pelo contato com os pneus. Essas técnicas são muito utilizadas em países como a Inglaterra e a Austrália, onde se busca aproveitar a pequena quantidade de chuva precipitada no ciclo das culturas.

Para trazer essas inovações para a agricultura brasileira, esse trabalho se propôs a estudar a viabilidade e rendimento das técnicas voltadas ao tráfego controlado no estado do Rio Grande do Sul (RS) onde atualmente grande parte das lavouras são manejada sob PD. O trabalho inicia-se diretamente na propriedade rural, acompanhando o processo de planejamento, adaptação do maquinário, implantação das culturas, coleta e análise de dados. Propõe-se uma análise ampliada e detalhada para ser desenvolvida em três anos e que possa oferecer não somente técnicas que aumentem a lucratividade do produtor e a produtividade e qualidade do solo, mas também o desenvolvimento e incentivo para que indústrias aprimorem seus maquinários e implementos.

Considerando todas essas questões e também com o intuito de apresentar uma nova contribuição para as pesquisas da Agricultura de Precisão no país, esta tese estuda a viabilidade de uma técnica, ainda inédita, e que prevê o deslocamento das linhas de tráfego, entre as safras, para melhorar as propriedades físicas do solo.

Para melhor compreensão das metodologias adotadas, esse estudo está dividido em três partes que analisam a adaptação e a adoção das técnicas e ferramentas relacionadas ao tráfego controlado e tráfego alternado anual, comparados ao tráfego tradicional.

Na primeira parte, verificou-se as alterações provenientes das intensidades de tráfego nas propriedades físico-hídricas do solo e a resposta produtiva da cultura da soja e aveia. Na segunda, é apresentada a análise da relação dos tipos de tráfego – intensidades de tráfego – com o desenvolvimento radicular e produtividade da cultura da soja. O terceiro trabalho aborda os resultados de maneira global, baseado no tipo de tráfego, apresentando a interpretação dos resultados e o retorno dos investimentos aplicados.

2. HIPÓTESES

I. A adoção do tráfego controlado propicia melhora das propriedades físicas nos locais sem tráfego do solo manejado sob PD;
II. A ação dos sulcadores da semeadora sobre as antigas linhas de tráfego é capaz de romper as camadas compactadas e melhorar as propriedades físico-hídricas do solo;
III. A compactação do solo reduz o comprimento do sistema radicular e a produtividade da soja;
IV. A implantação do sistema de tráfego controlado é economicamente viável para culturas anuais sob PD no Rio Grande do Sul.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o efeito do tráfego controlado e alternado anual do maquinário agrícola sobre as propriedades físico-hídricas do solo, comparando-os ao tráfego tradicional, observando o desenvolvimento e produtividade das culturas de soja e aveia.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

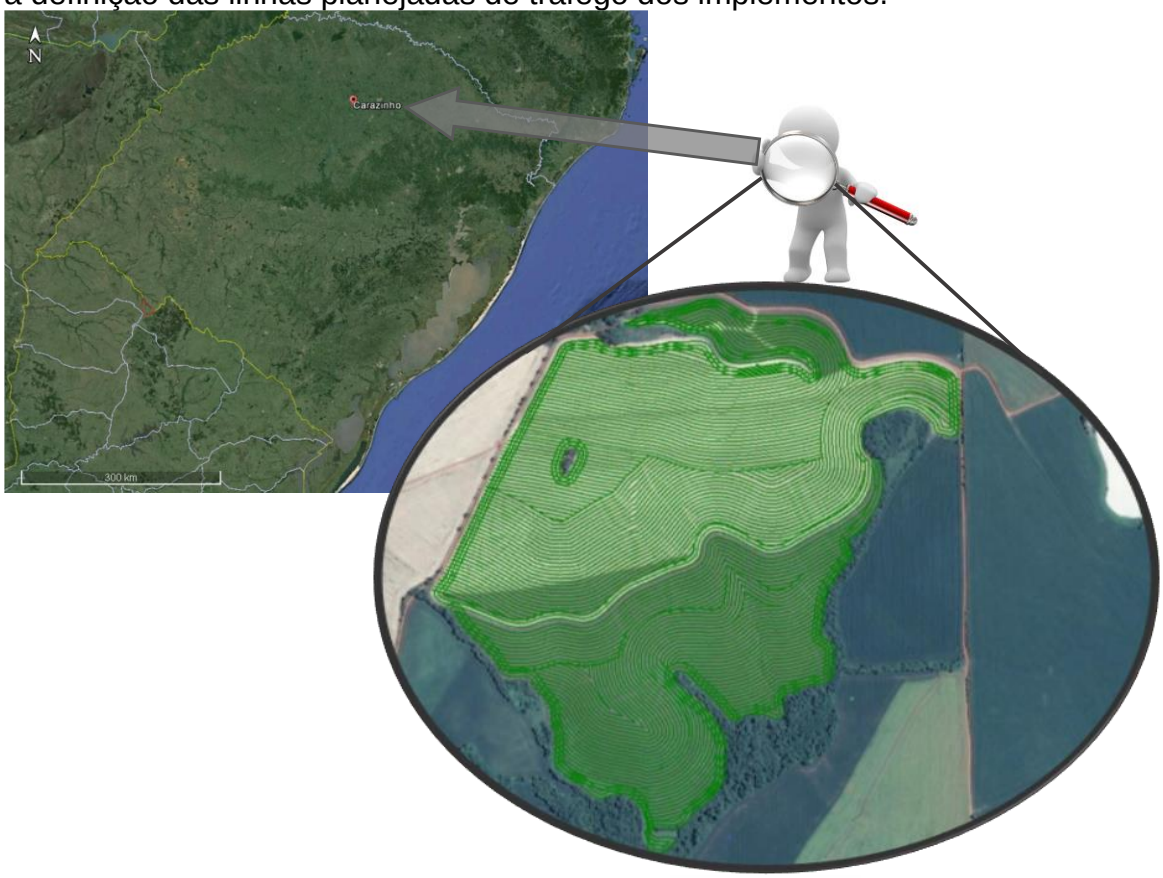
I. Avaliar o efeito das intensidades e tipos de tráfego nas alterações das propriedades físico-hídricas do solo;
II. Avaliar o efeito das intensidades e tipos de tráfego para a produtividade das culturas de soja e aveia;
III. Analisar o comprimento do sistema radicular da soja submetido aos diferentes tipos e intensidades de tráfego;
IV. Determinar a rentabilidade econômica para cada do tipo de tráfego estudado.

4. MATERIAL E MÉTODOS GERAL

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi conduzido em uma área agrícola comercial de 89 ha no município de Carazinho, Rio Grande do Sul – Brasil. Localizada nas coordenadas UTM zona 22J 336043 m E, e 6875204m S, a 600 m de altitude em relação ao nível do mar (Figura 1). O clima local é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen, temperado úmido com verão quente (ALVARES *et al.*, 2013), com precipitações pluviais médias anuais de 1856 mm e temperatura média anual de 22,1ºC (EMBRAPA, 2012). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (SANTOS *et al.*, 2013), Ferralsol (WRB, 2015), Typic Hapludox (USDA, 2014).

Figura 1. Localização do município de Carazinho no estado do Rio Grande do Sul, e a definição das linhas planejadas de tráfego dos implementos.



Fonte: O autor.

A área experimental é manejada sob PD há mais de 20 anos. Atualmente, predomina a sucessão de culturas da soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão e aveia

(*Avena strigosa* Schreb.) no inverno. Por se tratar de uma área comercial manejada pelo produtor rural, ela recebe os tratos culturais semelhantes aos de outras áreas manejadas por ele. A cada três anos, são realizadas aplicações de calcário à taxa variada, oscilando entre 2 a 3 Mg ha^{-1}, de acordo com a necessidade do solo baseado na camada de 0 – 0,10 m (CQFS RS/SC, 2004). A fertilização para cultura da soja tem se repetido, de forma fracionada, nos últimos anos. São aplicados como fonte de fósforo 120 kg ha^{-1} de Mono-Amônio-Fosfato (MAP 11-52-00), na semeadura. Já o potássio, à lanço, utiliza a fonte cloreto de potássio (KCl 60 %) 130 kg ha^{-1}. Para cultura da aveia são utilizados mais 60 kg ha^{-1} de MAP de mesma formulação. O solo foi coletado no florescimento da cultura da soja, safra 2017/18, para avaliação dos atributos químicos e físicos apresentados na Tabela 1. A camada analisada de 0 – 0,40 m foi estratificada em 6 camadas.

Tabela 1. Atributos químicos e físicos avaliados no período de florescimento da soja. Carazinho-RS, 2018.

	Argila	Silte	Areia	pH	Al	$CTC_{(T)}$	Ca	Mg	K	V	P
Camada (m)	- - - - - - - - - -	g kg^{-1}	- - - - - - - - - -	H_2O	- - - - - - - - - -	- - - - - - - - - -	$cmol_c$ dm^{-3}	- - - - - - - - - -	- - - - - - - - - -	%	mg dm^{-3}
1 (0 - 0,05)	300,4	283,6	416,1	5,4	0	16,9	8,2	2,9	139,5	67,8	33,5
2 (0,05 - 0,10)	334,4	265,2	400,3	5,0	0,4	16,5	6,2	2,4	79,7	53,0	17,7
3 (0,10 - 0,15)	347,6	271,3	381,1	4,9	0,4	16,1	5,3	2,3	50,2	48,1	13,1
4 (0,15 - 0,20)	353,4	280,1	366,4	4,8	0,8	16,8	4,9	2,3	41,1	43,7	7,0
5 (0,20 - 0,30)	362,6	289,4	348,0	4,7	1,0	16,6	3,8	2,2	31,6	37,2	3,3
6 (0,30 - 0,40)	397,8	273,6	328,7	4,6	1,1	16,4	3,1	2,1	25,0	33,4	2,0

Fonte: O autor.

O plantio da soja, na área, foi feito no mês de novembro. Antes dessa operação, ocorreu a dessecação da aveia. A densidade de semeadura equivale a 7 sementes por metro linear, com espaçamento utilizado de 0,34 m. A redução do espaçamento entre linhas faz com que as plantas de linhas paralelas fiquem mais próximas e as plantas da mesma linha mais espaçadas. Ocorrendo assim, a melhor distribuição das plantas no terreno. A população estabelecida nas safras de soja foi de aproximadamente 200 mil plantas ha^{-1}.

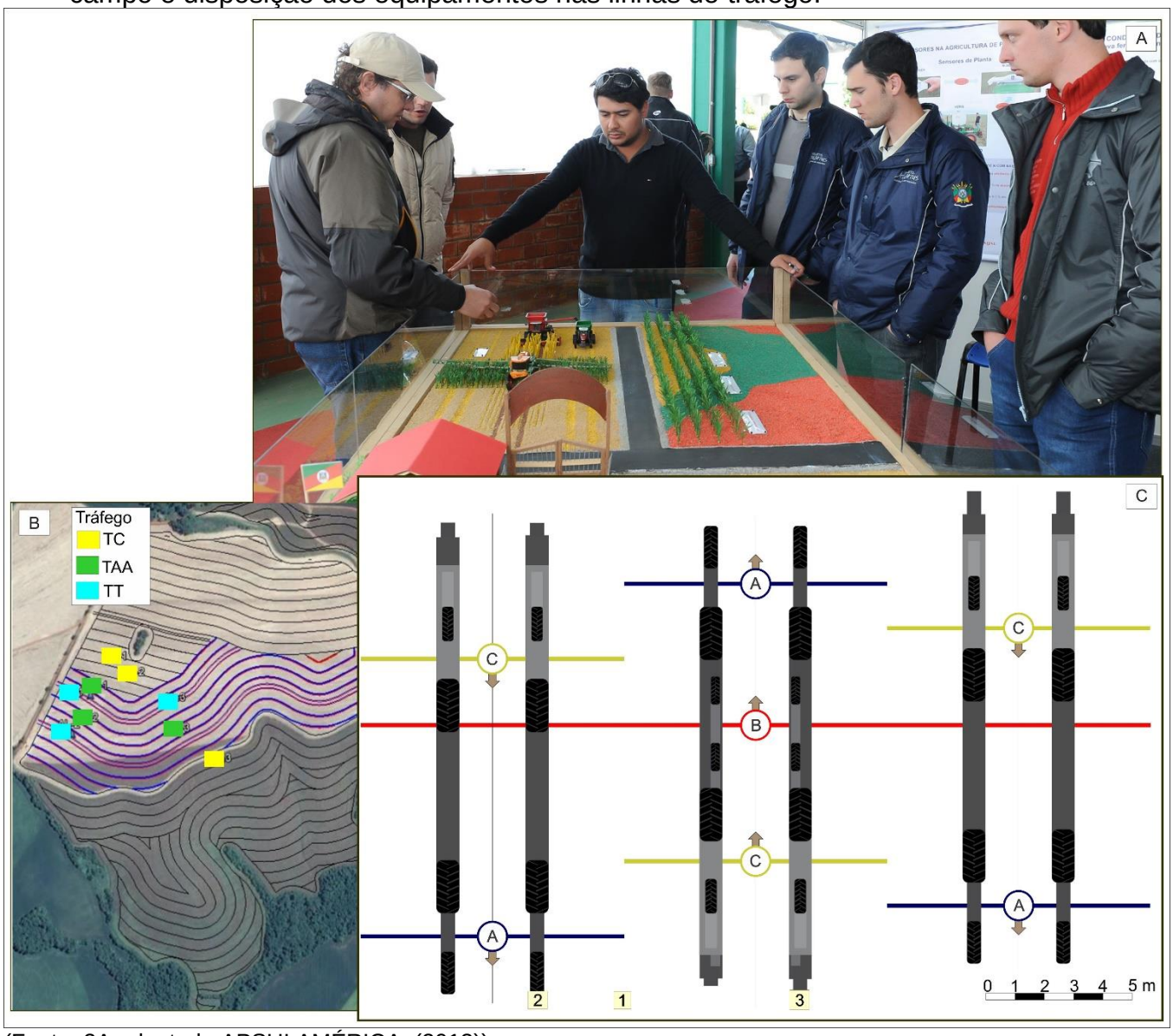
4.2 ADOÇÃO DO TRÁFEGO CONTROLADO

Para adoção do TC devem ser observados diversos fatores, como utilização de GNSS de elevada precisão, operadores das máquinas estimulados e que acreditem no potencial de sucesso que a ferramenta poderá proporcionar a longo prazo. Um dos

principais entraves e que representa a maior dificuldade, diz respeito a adaptação do maquinário e implementos, pois no Brasil não temos essa tecnologia adotada em larga escala.

A Figura 2A apresenta um registro do 2ª APSul América realizado em 2013, na cidade de Não-Me-Toque, onde o Projeto Aquarius apresentou uma maquete interativa e conceitual das atividades de agricultura de precisão e dentre elas, o tráfego controlado. Os estudantes da UFSM, participantes do grupo de pesquisa Projeto Aquarius, engajados na adoção de novas tecnologias no campo, recomendaram ao produtor e proprietário da área, Marcos Souilljee, que o experimento fosse desenvolvido. Ele que já conhecia a ferramenta e os seus pontos positivos, principalmente os resultados em trabalhos conduzidos no exterior, ficou motivado pelo desafio de aplicar uma tecnologia. Assim, iniciou a busca para adaptação das máquinas, implementos e ferramentas necessárias para adotar o tráfego controlado.

Figura 2. Maquete conceitual da agricultura de precisão apresentada no APSul América 2013, linhas de tráfego planejada, localização dos blocos de avaliação no campo e disposição dos equipamentos nas linhas de tráfego.



(Fonte: 2A adaptada APSULAMÉRICA, (2013))
Figura 2B: Locais de avaliação: amarelo – tráfego controlado, verde – tráfego alternado anual, azul – tráfego tradicional. Figura 2C: Letras representando os implementos: A – Trator e semeadora, B – Pulverizador, C – Colhedora. Números representando intensidade de tráfego: 1 – Sem tráfego (ST), 2 – Tráfego médio (Tme), 3 – tráfego máximo (Tma).

Para tal, teve seu início no projeto das linhas de tráfego (Figura 2 B)., realizadas no Software Farm Works® a partir dos do levantamento planialtimétrico da área. O desenho das linhas buscou propiciar o deslocamento dos implementos em nível, visando reduzir a erosão pelo escoamento superficial. Com isso, foi considerado a inclinação do relevo máxima de 5 %, buscando reduzir o número de manobras

As bitolas dos implementos não precisam necessariamente ser iguais, contudo o rastro deixado pelos pneus deve ser coincidente, em virtude da largura dos maiores

pneus sobrepor o rastro dos pneus de menor largura. Já a largura de trabalho dos implementos, preferencialmente, deve ser a mesma, ou larguras múltiplas de equipamentos menores para maiores, como o exemplo das relações 5:15, 6:18, 7:21, 8:24, 9:27; 10:30 e 12:32 m. Assim, adotamos, neste trabalho, adaptação para as dimensões de 9,0 m para trator/semeadora e colhedora, já o pulverizador 27,0 m. Assim foi possível determinar que as linhas de deslocamento do trator/semeadora e colhedora seriam 3 vezes mais que o pulverizador, coincidentes como mostra a Figura 2C.

Para o correto direcionamento das máquinas foi utilizado o sistema de piloto automático Trimble EZ-Pilot para trator e colhedora. A correção do sinal GNSS foi realizada pelo sistema CenterPoint® RTX Trimble que utiliza o sinal pago de satélites estacionários e que envia dados para o monitor realizar a correção, possibilitando assim que o sistema tenha precisão de 0,04 m (TRIMBLE, 2017).

4.3 ADAPTAÇÃO DE MÁQUINAS E IMPLEMENTOS

As máquinas e implementos utilizados foram os mesmos para as atividades no período (2015 – 2018) de avaliações. O maquinário e implementos necessitaram adaptações para utilização em larguras de trabalho de 9,0 e 27,0 m.

O trator utilizado para realização das semeaduras foi um Massey Ferguson modelo MF 7415 Dyna-6 (Figura 3A), com potência no motor de 215 CV e aproximadamente ~7000 kg eixo^{-1} com lastros. A bitola (distância do centro de um pneu a outro no mesmo eixo) dianteiro e traseiro foi adaptada para dimensão de 3,05 m. Os pneus utilizados no eixo dianteiro foram de 18,4” de aro 26” e no eixo traseiro 30,50” de aro 32”.

Foram utilizadas duas semeadoras Semeato, modelo SSM 27 com largura de trabalho de 4,5m cada (Figura 3B). Esse modelo possui opções de regulagem de espaçamento de linhas possibilitando o melhor ajuste para grãos finos e grossos.

Figura 3. Semeadura da aveia e detalhes das semeadoras utilizadas na cultura da aveia.

Fonte: O autor.

Foi utilizado um cabeçalho tandem para unir as duas semeadoras, deixando-as desencontradas (a primeira cerca de 3 metros à frente da segunda). O tandem continha pistões hidráulicos que realizavam a correção do alinhamento das plantadeiras, com isso evitou-se áreas com sobreposição ou falhas na lavoura. A regulagem para grãos finos (aveia) foi adotada no inverno, com linhas espaçadas em 0,17 cm. Cada plantadeira possuía 27 linhas, totalizando 54 linhas no conjunto. Em cada semeadora foram utilizados 24 discos duplos de 0,406 e 0,381 m, junto com 3 discos de 0,70 m e 3 sulcadores do tipo hastes alinhados com os pneus do trator (Figura 3C). Com isso, foi realizado uma escarificação nas linhas de tráfego pelos

discos de 0,70 e sulcadores, como verificado na Figura 3B. Os registros do penetrômetro verificaram a ação desse conjunto até 0,23 m. Essa configuração de discos duplos mais haste sulcadora foi utilizada apenas na implantação da cultura de cobertura do inverno. Um estudo verificou que a utilização dessa configuração gerou maior patinagem (3,85%), demanda maior potência (65 kW) e utilização (41,1%) do motor do trator quando comparado a utilização de somente os discos duplos (BERTOLLO, *et al.*, 2018). As semeadoras foram reguladas para trabalhar em espalhamento de 0,34 entre linhas, na regulagem para grãos grossos realizada para implementar a cultura de verão (soja). Cada semeadora continha 13 linhas discos duplos de 0,406 e 0,381 m e, no conjunto, eram realizadas as semeaduras de forma simultânea nas 26 linhas dos 9m de largura de trabalho.

O trator da marca New Holland (Figura 4A), modelo 8030 s100, com potência no motor de 121 CV e aproximadamente ~2500 kg eixo^{-1} com lastros. A bitola dos eixos dianteiro e traseiro foram adaptados para dimensão de 2,74 m, com pneus utilizados em ambos eixos, de 12,40” de aro 24”. Esse trator foi utilizado nas entradas na lavoura de soja para realização das aplicações do cloreto de potássio em cobertura nos rastros de deslocamento do pulverizador.

A Figura 4B apresenta o pulverizador utilizado, de marca JAN, modelo Power Jet 2500 4x4, barras de aplicação dianteiras, potência no motor de 130 CV e aproximadamente ~4500 kg eixo^{-1} carregado. A dimensão da bitola dos eixos de 2,74 m, utilizando pneus 12,40” de aro 36” em ambos os eixos. As barras originais de 24,0 m foram adaptadas e alongadas para a largura de trabalho de 27,0 m.

Figura 4. Trator, pulverizador, reboque e colhedora adaptados para o tráfego controlado.

Fonte: O autor.

Na Figura 4C é apresentado o implemento utilizado para o transporte de grãos da marca JAN, modelo Tanker 12000, que possui capacidade de carga de 12 m^3. Nesse implemento foi adaptado a largura da bitola para coincidência das linhas de tráfego dos demais implementos, e instalada uma extensão no topo do graneleiro de aproximadamente 1,5 m, a fim de possibilitar o descarregamento de grãos pela colhedora.

A colhedora utilizada foi uma Case IH (Figura 4D), modelo 2388 Axial-Flow, potência no motor de 284 CV e aproximadamente ~12600 kg $eixo^{-1}$ com plataforma de

corte e grãos. A colhedora era equipada com pneus 30,5” de aro 32” no eixo dianteiro e 14,9” aro 24” no eixo traseiro. A bitola em ambos os eixos media 3,05 m. A plataforma de corte para colheita, possuía largura de trabalho de 9 m. A colhedora contava com o conjunto de monitores AFS (*Advanced Farming System*), os quais contem sensores de produtividade e umidade dos grãos. O tubo de descarga dos grãos que originalmente media 5,5 m foi alongado para 7,5 m, possibilitando assim a descarga de grãos no graneleiro, na linha paralela ao deslocamento.

4.4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O desenho experimental foi planejado seguindo uma estrutura hierárquica de maneira que o primeiro nível foram as faixas contendo os tratamentos [tipo de tráfego (intensidade de tráfego)], dentro de cada faixa foram feitas as repetições; e ainda para cada repetição foram analisadas seis profundidades.

O fator tipo de tráfego possui os níveis: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). O fator intensidade de tráfego apresenta os níveis: sem tráfego (ST), tráfego médio (trator) (Tme) e tráfego máximo (trator + pulverizador) (Tma).

4.5 DESCRIÇÃO DOS TRATAMENTOS

Os tratamentos foram estabelecidos pelos tipos tráfego, e para cada tráfego haviam diferentes níveis de intensidade para cada tráfego. Os tipos de tráfego adotados foram: tráfego tradicional, tráfego controlado e tráfego alternado anual. As características de cada tráfego e suas intensidades estão descritas a seguir.

4.5.1 Tráfego tradicional (TT)

O TT corresponde ao tráfego praticado usualmente, no qual os implementos não se deslocam nas mesmas linhas, por falta da rastreabilidade. A única exceção é o pulverizador, cujas linhas se mantêm, devido ao amassamento deixados na safra que se encontra. Kroulík *et al.* (2009), registra contato dos pneus com o solo em cerca

de 55,7 % da superfície, para o TT em uma safra sob PD. Neste trabalho, as intensidades avaliadas foram:

- TT - Sem tráfego (ST): Nesses locais, durante a safra atual (ciclo da cultura), as plantas não foram influenciadas por amassamentos;
- TT – Tráfego máximo (Tma): Nesses locais, durante a safra atual (ciclo da cultura), as plantas foram amassadas para realização das aplicações de defensivos agrícolas.

4.5.2 Tráfego controlado (TC)

As características do TC seguiram os conceitos de confinar o trânsito dos implementos em faixas de tráfego permanentes. Assim, separando a área em dois locais segundo Isbister *et al.* (2013), um sendo o solo não compactado destinado a cultivo, o outro às “estradas“ permanentes que serão locais compactados pelo peso das máquinas e implementos. Pela disposição do TC, nesse estudo, foram considerados três intensidades:

- TC – Sem tráfego (ST): Solo não compactado, pelo deslocamento dos implementos desde o início da implantação do TC;
- TC – Tráfego médio (Tme): Local do solo onde as linhas foram projetadas e mantidas para o tráfego do maquinário destinado ao plantio (trator) e colheita (colhedora). Nesses locais, durante a safra (ciclo da cultura), as plantas não foram influenciadas por amassamentos;
- TC – Tráfego máximo (Tma): Local do solo onde as linhas foram projetadas e mantidas para o tráfego do maquinário destinado ao plantio (trator), pulverizações (pulverizador) e colheita (colhedora). Nesses locais durante a safra (ciclo da cultura), as plantas foram amassadas para realização das aplicações de defensivos agrícolas.

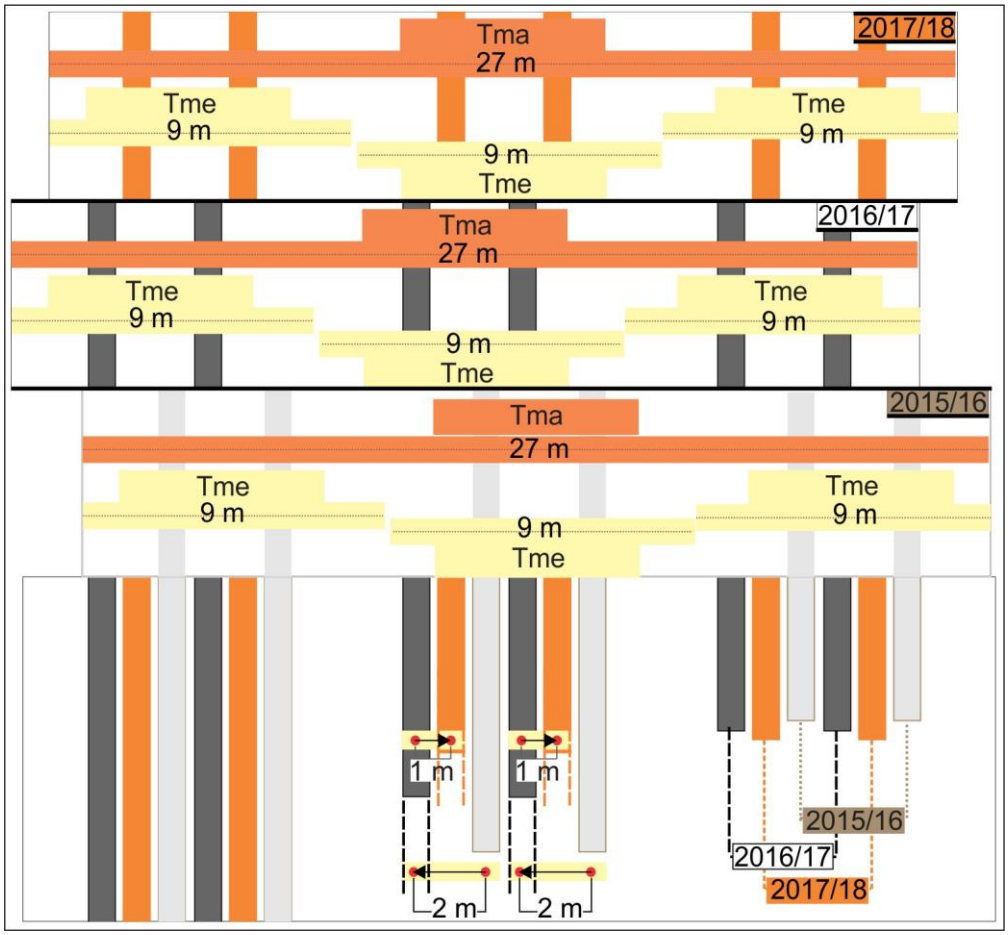
4.5.3 Tráfego alternado anual (TAA)

Este tipo de tráfego TAA foi proposto a ser estudado neste trabalho, e conceitualmente foi semelhante ao TC pela utilização do controle dos deslocamentos nas atividades. Durante a primeira safra TAA e TC foram idênticos (2015/16), já na

segunda safra (2016/17) todas as linhas de tráfego foram deslocadas 2 m. Na última safra (2017/18), todas as linhas foram deslocadas 1 m. Todos exemplificados na Figura 5.

Os deslocamentos das linhas de tráfego foram realizadas após a primeira aplicação de defensivos na cultura da aveia, todas as linhas eram deslocadas, sendo esse procedimento adotado para os dois (safra 2016 e 2017) deslocamentos realizados.

Figura 5. Deslocamento das linhas do tráfego alternado anual para as três safras avalias.



Fonte: o autor.

Mantendo-se a rastreabilidade das linhas de tráfego, foi possível avaliar o efeito das seguintes intensidades:

- TAA – Sem tráfego (ST): Solo não compactado pelo deslocamento dos implementos desde início da implantação do TC;
- TAA – Tráfego médio (Tme): Local do solo onde as linhas foram projetadas para o tráfego apenas na safra atual do maquinário destinado ao plantio (trator)

e colheita (colhedora). Nesses locais, durante a safra (ciclo da cultura), as plantas não foram influenciadas por amassamentos;

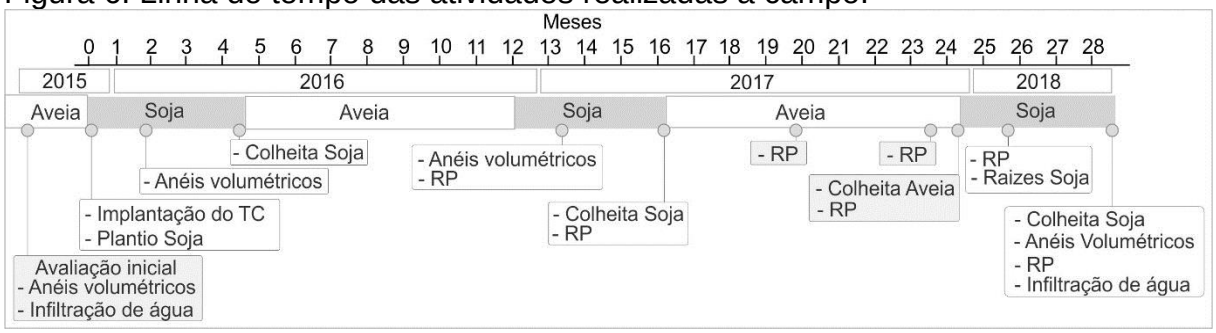
- TAA – Tráfego médio 1 (Tme1): Local do solo onde as linhas foram projetadas para o tráfego apenas na safra de um (1) ano atrás do maquinário destinado ao plantio (trator) e colheita (colhedora). Nesses locais durante a safra (ciclo da cultura), as plantas não foram influenciadas por amassamentos;
- TAA – Tráfego médio 2 (Tme2): Local do solo onde as linhas foram projetadas para o tráfego apenas na safra de dois (2) anos atrás do maquinário destinado ao plantio (trator) e colheita (colhedora). Nesses locais durante a safra (ciclo da cultura), as plantas não foram influenciadas por amassamentos;
- TAA – Tráfego máximo (Tma): Local do solo onde as linhas foram projetadas para o tráfego apenas na safra atual do maquinário destinado ao plantio (trator), pulverizações (pulverizador) e colheita (colhedora). Nesses locais durante a safra (ciclo da cultura), as plantas foram amassadas para realização das aplicações de defensivos agrícolas;
- TAA – Tráfego máximo 1 (Tma1): Local do solo onde as linhas foram projetadas para o tráfego apenas na safra de um (1) ano atrás do maquinário destinado ao plantio (trator), pulverizações (pulverizador) e colheita (colhedora). Nesses locais durante a safra (ciclo da cultura), as plantas foram amassadas para realização das aplicações de defensivos agrícolas;
- TAA – Tráfego máximo 2 (Tma2): Local do solo onde as linhas foram projetadas para o tráfego apenas na safra de dois (2) anos atrás do maquinário destinado ao plantio (trator), pulverizações (pulverizador) e colheita (colhedora). Nesses locais durante a safra (ciclo da cultura), as plantas foram amassadas para realização das aplicações de defensivos agrícolas.

As intensidades de tráfego Tme1 e Tma1 foram observadas nas safras de 2016/17, 2017 e 2017/18, enquanto as intensidades de tráfego Tme2 e Tma2 foram apenas nas safras 2017 e 2017/18 para as culturas de aveia e soja. Isso ocorre em virtude de não ter ocorrido o deslocamento das linhas de tráfego, sendo assim as intensidades ainda não haviam sido efetuadas no campo.

4.6 DESCRIÇÃO DAS AVALIAÇÕES REALIZADAS

As avaliações realizadas buscaram identificar as possíveis interferências que os tratamentos causaram, principalmente sobre as propriedades físico-hídricas do solo e a resposta no desenvolvimento e na produtividade das culturas. Na Figura 6 são apresentadas as sequências das atividades a campo. O processo da análise se deu, em grande parte, no Laboratório de Uso e Manejo do Solo e as análises com amostras de solo, com estrutura preservada, no Laboratório de Física do Solo, ambos localizados no Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Figura 6. Linha do tempo das atividades realizadas a campo.



Fonte: O autor.
Resistência a penetração (RP).

Todas as avaliações no solo seguiram profundidades padrões para as avaliações. Na Tabela 2 estão apresentadas as camadas e suas respectivas profundidades e o centro de cada camada. Nas camadas apresentadas foram realizadas as coletas de amostras indeformadas em anéis volumétricos, coleta de solo para análise química física (textura), avaliação do sistema radicular da soja e realização das médias das camadas dos registros de resistência a penetração (RP).

Tabela 2. Camadas de solo avaliadas.

Camada	Profundidade (m)			Centro da camada (m)
1	0,00	-	0,05	0,025
2	0,05	-	0,10	0,075
3	0,10	-	0,15	0,125
4	0,15	-	0,20	0,175
5	0,20	-	0,30	0,25
6	0,30	-	0,40	0,35

Fonte: O autor.

Para localização dos locais de avaliação a campo era utilizado um receptor GNSS de mão, marca Garmin® e modelo GPSMAP 64 com precisão de aproximadamente 3,65 m. Tal precisão era insuficiente para realização do trabalho. Com isso, foi utilizado o receptor para localização do local aproximado de coleta. Após, utilizavam-se os rastros do pulverizador como referência em cada local, com ajuda de uma trena os locais de coleta eram aferidos pelas medidas conhecidas das bitolas e largura dos equipamentos. Após a primeira visita ao bloco, os locais eram identificados com estacas metálicas com uma fita colorida na ponta para visualização a distância. Cada estaca compreendia aproximadamente 1,70 m de altura de 4,2 mm, e eram flexíveis a ponto de não causar danos as barras de pulverização.

4.6.1 Amostras de solo indeformadas para avaliação de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

Para a coleta de solo indeformadas com auxílio de anéis volumétricos a campo foram abertas pequenas trincheiras com auxílio de uma broca motorizada com diâmetro de 0,50 m e profundidade de aproximadamente 0,60 m (Figura 7A). As bordas da trincheira eram cuidadosamente limpas e verificadas, para evitar danos que inviabilizassem as amostras. Cada anel utilizado na coleta media aproximadamente 0,04 m de altura e 0,06 m de diâmetro. Ainda no campo, cada anel foi individualmente identificado (Figura 7B) e envolto em plástico filme de PVC de 0,01mm para preservar a estrutura, durante o transporte.

Após, em laboratório, foi seguida a metodologia proposta por Embrapa (2011) para determinação de densidade do solo (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT). Para a determinação da macroporosidade utilizou-se a tensão de -6 kPa (Figura 7C). Para microporosidade, as amostras foram para a estufa onde permaneceram por 48h a 105°C. As avaliações ocorreram em 4 épocas, sendo elas: caracterização inicial (novembro 2015); florescimento da soja (janeiro 2016); florescimento da soja (fevereiro 2017); pós colheita (abril 2018).

Figura 7. Abertura das trincheiras (A), coleta de solo com anéis volumétricos (B), avaliação do solo na coluna de areia.

Fonte: O autor.

4.6.2 Avaliações de infiltração de água no solo

Para determinação da infiltração de água no solo foi utilizado o método do duplo anel concêntrico apresentado na Figura 8, descrita por Embrapa (1979). As leituras foram tomadas nos seguintes intervalos de tempo: 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75 e 90 min após o início do teste. Na caracterização inicial, em novembro de 2015, na cultura da aveia, foram realizadas sete repetições em três locais. Na segunda avaliação, após a colheita da cultura da soja da safra 2017/18, passados 28 meses da implantação dos tratamentos, optou-se por reduzir para 4 repetições, devido à grande quantidade de tratamentos.

Os registros lidos na régua a campo (Figura 8B) de infiltração foram convertidos em infiltração instantânea (VI) e infiltração acumulada (I), propostas por Kostiakov (BERNARDO et al., 2006), como mostram as equações abaixo.

Equação 1. Velocidade infiltração instantânea (mm h^{-1})*:

$$VI = 600 \,.\, K \,.\, a . T^{a-1} \qquad (1)$$

Equação 2. Infiltração acumulada (mm)*:

$$I = 10\,.\ K.T^{a} \qquad (2)$$

Onde:

VI = Infiltração instantânea

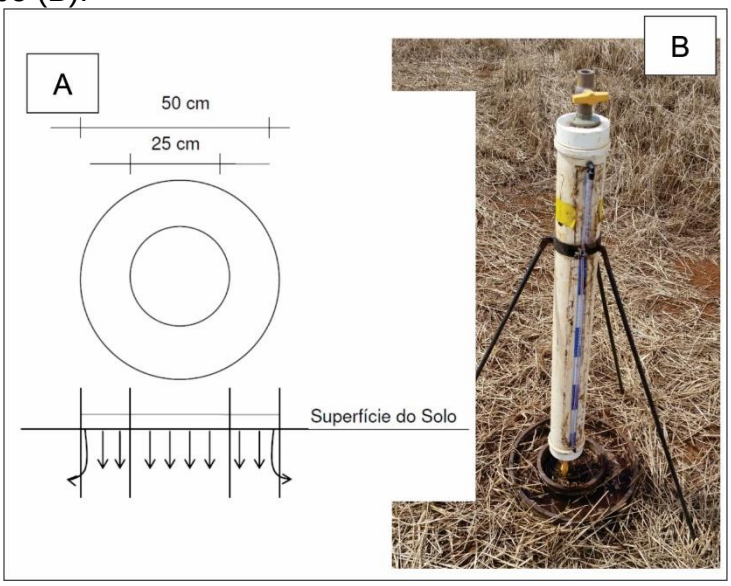
I = Infiltração acumulada

a e K = constante, dependente do solo.

T = Tempo

*as equações foram adaptadas para nas unidades de resposta: de cm para mm, e cm min^{-1} para mm h^{-1}.

Figura 8. Detalhes e dimensões dos duplos anéis (A), e imagem do infiltrômetro em avaliação a campo (B).



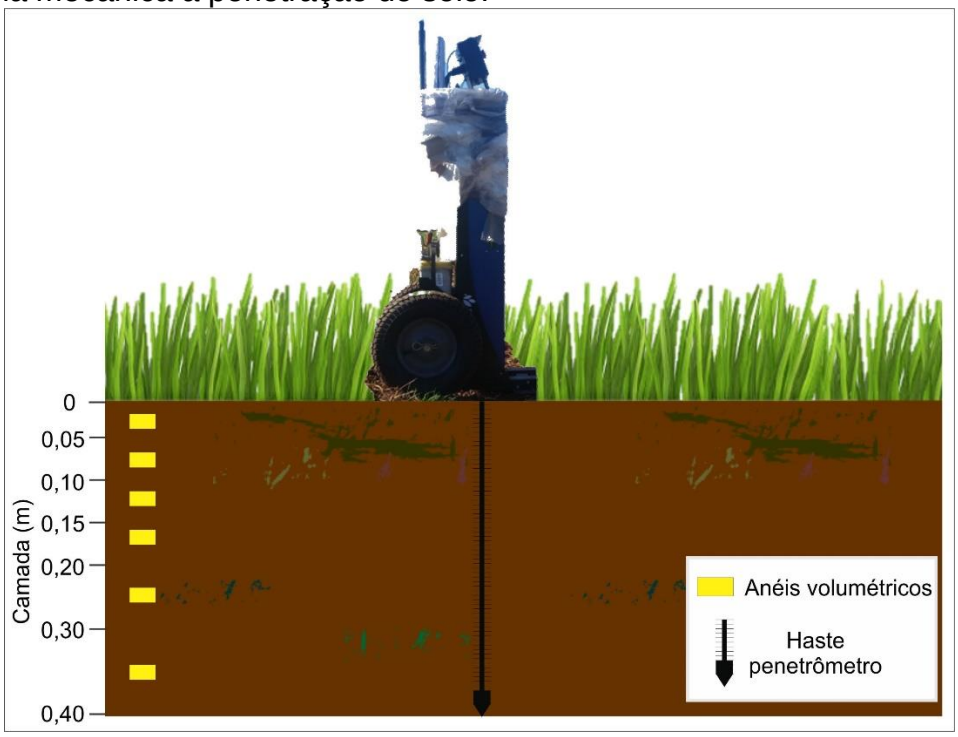
Fonte: Adaptado de Carvalho & Batista Da Silva (2006).

4.6.3 Avaliação da resistência mecânica a penetração do solo

As avaliações de RP foram realizadas com o penetrômetro SoloTrack (PLG5300) Falker. Os registros ocorrem através de uma célula de carga e por intermédio da inserção da haste, com velocidade automatizada em 0,024 m s^{-1}. Foi utilizado cone tipo 2 (diâmetro de 12,83 mm), com ângulo 30° (ASAE, 1976). O equipamento foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m, da superfície do solo até a profundidade de 0,40 m. Em cada parcela foram realizadas 5 réplicas da avaliação da RP. A haste do equipamento (penetrômetro) sempre foi alocada na entrelinha da cultura estabelecida e está apresentada na Figura 9. O solo foi coletado

para determinação da umidade, para avaliação em cada uma das seis profundidades médias apresentadas previamente.

Figura 9. Representação da coleta de anéis volumétricos estratificados e avaliação da resistência mecânica a penetração do solo.



Fonte: O autor.

As avaliações de resistência à penetração do solo (RP) foram realizadas em 7 épocas: Avaliação 1 – florescimento da soja (janeiro, 2017); Avaliação 2 – pós-colheita da soja (março, 2017); Avaliação 3 – desenvolvimento aveia (julho, 2017); Avaliação 4 – final do ciclo da aveia (novembro, 2017); Avaliação 5 – plantio da soja (novembro, 2017); Avaliação 6 – florescimento da soja (fevereiro, 2018); Avaliação 7 – pós-colheita da soja (abril, 2018).

4.6.4 Análises químicas e físicas do solo

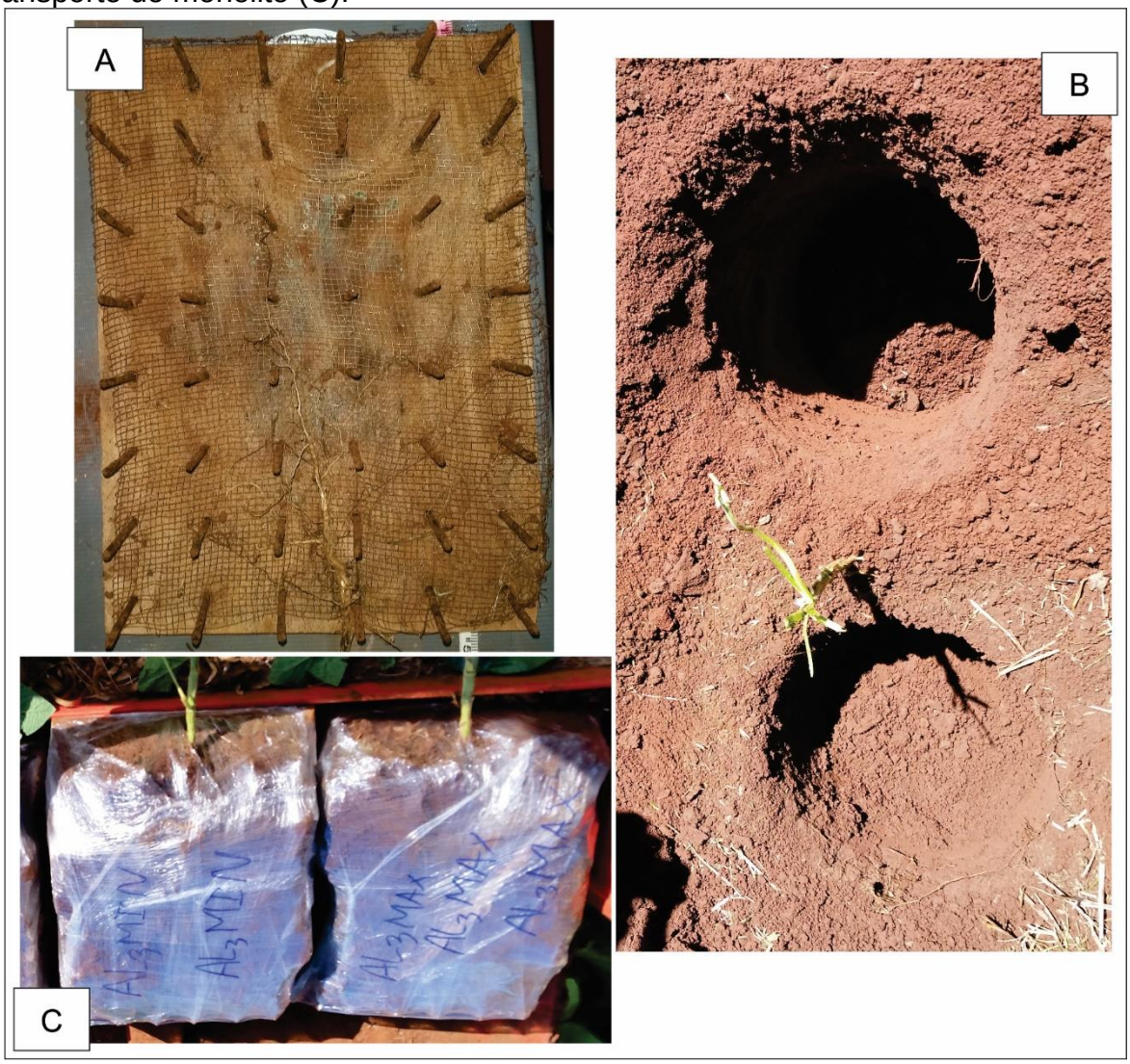
As coletas de solo para avaliação química e física ocorreram no estágio do florescimento da cultura da soja, juntamente com a coleta do sistema radicular nos locais ST, nas profundidades descritas na Tabela 4. O método para a análise química de solo foi realizado conforme Tedesco *et al.* (1995), assim foram realizadas as determinações químicas: pH em água (1:1 solo-água), teor de alumínio ($Al3^{+}$) extraído com KCl 1 mol L^{-1} e titulado com NaOH 0,0125 mol L^{-1}, Ca^{+2} e magnésio (Mg^{+2})

extraídos com KCL 1 mol L^{-1} e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, fósforo (P) e potássio (K^+) extraídos com solução de Mehlich-I. A concentração de P foi determinada por colorimetria usando molibidato de amônio e o teor de K^+ foi determinado por fotometria de chama. A determinação da textura do solo seguiu o método descrito por Embrapa (2017), para determinar as frações de argila, silte e areia.

4.6.5 Avaliação do sistema radicular

A coleta das raízes da soja ocorreu quando a cultura estava em estágio R2. Foi utilizado o método do monolito (adaptado de BÖHM, 1979). A estrutura para coleta de cada monolito possuía uma tábua de madeira nas dimensões de 0,30 por 0,40 por 0,02 m, com pregos espaçados a cada 0,05 m (Figura 10A). A estrutura também continha uma malha de aço inoxidável de 2 mm, com o objetivo de ajudar a manter as raízes da soja em seu lugar durante a lavagem. Para retirada do monolito do solo, foram abertas trincheiras a distância de 0,10 m do caule da planta a ser coletada, cada trincheira era de aproximadamente 0,50 m de profundidade, 0,40 m de largura e 0,50 m de diâmetro (Figura 10B). Os pregos da estrutura da tábua foram inseridos na parede da trincheira, perpendicularmente a linha de plantio da soja, sendo retirado o monolito com as raízes preservadas e volume de 0,24 m^3, envoltos com filme de PVC 0,01 mm para preservação no transporte e armazenamento (Figura 10C).

Figura 10. Tábua de pregos(A), abertura das trincheiras para coleta (B) e método de transporte do monolito (C).



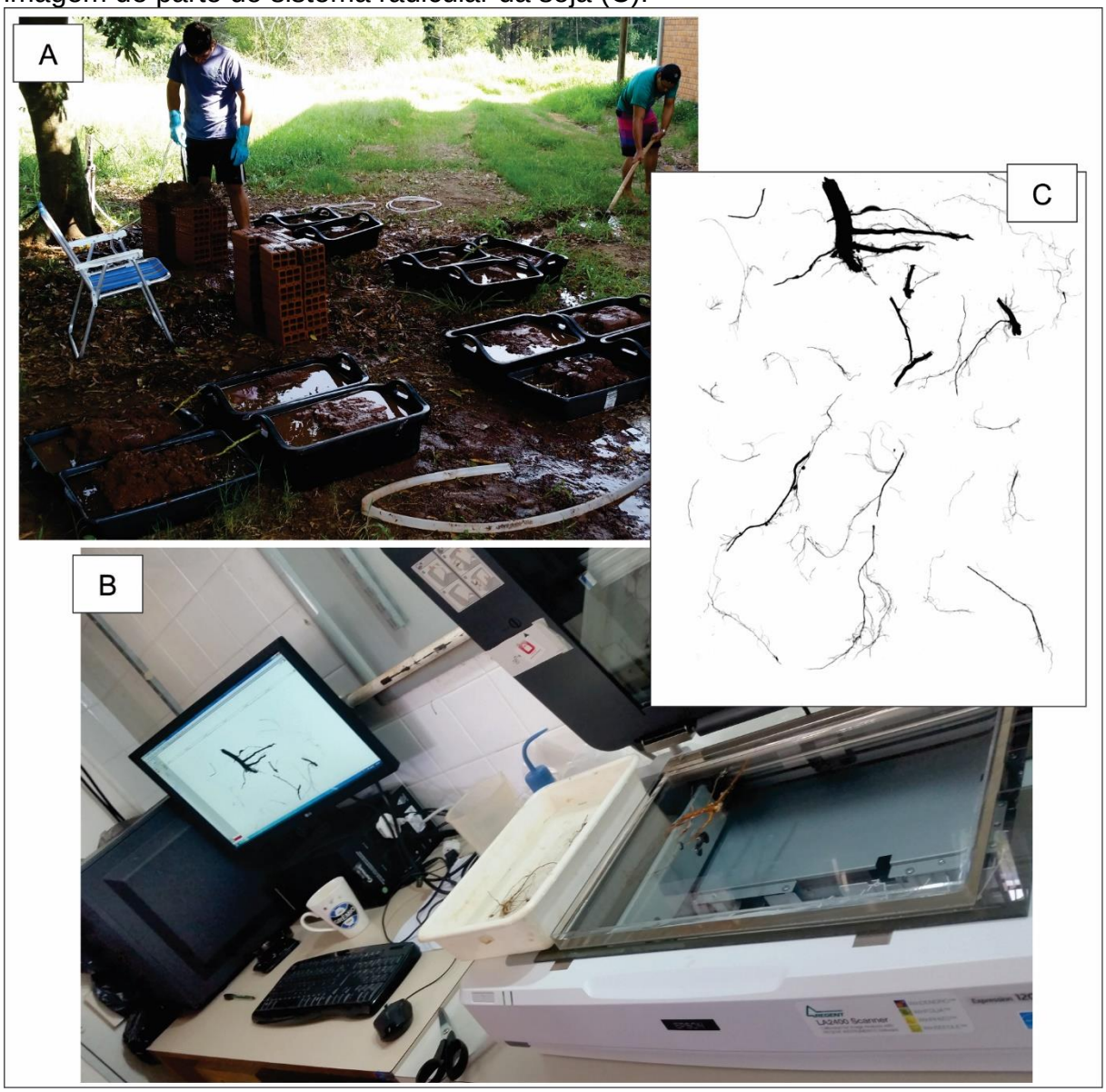
Fonte: O autor.

Em laboratório os monolitos foram colocados em caixas plásticas de 33,6 l (dimensões 0,55 x 0,18 x 0,34 m) completadas com água. Após o umedecimento, a água foi substituída por uma solução de NaOH a 1 %, e as amostras permaneceram em repouso por 6h na solução para promover a dispersão da argila do solo. O tempo e a concentração da solução visaram minimizar os danos causados às raízes durante a lavagem (Figura 11A). Após a limpeza das raízes, foram cortadas em seis camadas, como descrito na Tabela 4, acondicionadas em sacos plásticos e guardadas no freezer a aproximadamente -20ºC para conservação até o momento da análise.

A avaliação do comprimento radicular foi realizada digitalizando as raízes com um scanner (Epson Expression 12000XL, Epson América, Inc., Long Beach, CA) na resolução de 800 dpi (Figura 11B). As imagens geradas como a Figura 11C foram

analisadas usando o software WinRhizo Arabidopsis (Régent Instruments, Québec City, QC, Canadá). As classes de raízes foram estabelecidas com base no diâmetro das raízes e divididas em quatro classes: RT(raízes totais), R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm), conforme proposto por LI *et al.* (2017).

Figura 11. Lavagem (A) e análise e escaneamento no software WinRhizo (B), e imagem de parte do sistema radicular da soja (C).



Fonte: O autor.

4.6.6 Avaliação da produtividade

Foram avaliadas duas culturas durante o período de três anos: a produtividade da soja foi avaliada durante 3 safras e a massa seca da aveia uma vez. Para determinação da produtividade de grãos de soja, foram coletas manualmente 3,0 m lineares de uma fileira totalizando uma área de 1,02 m^2, sendo que para cada unidade experimental foram coletadas cinco réplicas.

As amostras foram debulhadas, limpas, pesadas e tiveram a umidade corrigida a 13 %, e as avaliações foram convertidas para kg ha^{-1}. Para avaliação da massa seca da aveia foram coletadas 2 linhas de 1,0 m totalizando uma área de 0,34 m^2, com quatro réplicas por unidade experimental. As amostras foram secas e convertidas para kg ha^{-1}. Optou-se por não utilizar o sensor de rendimento de grãos acoplado a colhedora, pelo fato de não ser possível diferenciar as intensidades de cada tráfego.

4.6.7 Registros pluviométricos

A precipitação foi acompanhada quinzenalmente no site da cooperativa Cotrijal (COTRIJAL, 2018), a qual possui uma rede de estações automáticas nos seus entrepostos. Os dados (histórico de chuvas) eram disponibilizados gratuitamente no site da Cotrijal e foram anotados em uma planilha Office Excel®. Utilizaram-se 4 entrepostos para compor a média ponderada devido à proximidade da área. Assim, as estações mais próximas receberam maiores pesos para geração das médias pluviométricas. Os entrepostos utilizados foram: São José do Centro (12,5 %); Pinheiro Marcado (12,5 %); Encruzilhada Muller (25 %); Carazinho – glória (50 %).

4.6.8 Avaliação da área trafegada

Foram avaliadas as porcentagens da área para cada intensidade e tipo de tráfego na lavoura. Para tal, no campo, foram realizadas medições da largura do maior pneu utilizado, já que os demais trafegavam no mesmo rastro deste. As avaliações foram realizadas em três locais que apresentavam as intensidades de tráfego ST, Tme e Tma como proposto por Bertollo (2018). Para determinação das porcentagens de área de cada intensidade utilizou-se as equações a seguir:

Equação 3. Área trafegada TT Tma (%).

$$TT\ aTma = 2.LP^{ST}.3{,}704$$

Equação 4. Área trafegada TC Tma (%).

$$TC\ aTma = 2.LP^{Tma}.3{,}704$$

Equação 5. Área trafegada TC Tme (%).

$$TC\ aTme = 4.LP^{Tme}.3{,}704$$

Equação 6. Área não trafegada TC ST (%).

$$TC\ aST = 100 - TC\ aTma - TC\ aTme$$

Equação 7. Área trafegada* TAA Tma (%).

$$TAA\ aTma = 2.LP^{ST}.3{,}704$$

Equação 8. Área trafegada** TAA Tme (%).

$$TAA\ aTme = 4.LP^{ST}.3{,}704$$

Equação 9. Área não trafegada TAA ST (%) safras 2016 e 2016/17.

$$TC\ aST = 100 - 2.TAA\ aTma - 2.TC\ aTme$$

Equação 10. Área não trafegada TAA ST (%) safras 2017 e 2017/18.

$$TC\ aST = 100 - 3.TAA\ aTma - 3.TAA\ aTme$$

Onde:

LP^{Tma} = largura do pneu em área com histórico de tráfego máximo (Tma).

LP^{Tme} = largura do pneu em área com histórico de tráfego médio (Tme).

LP^{ST} = largura do pneu em área sem histórico de tráfego (ST).

* Utilizado para as intensidades Tma, Tma1, Tma2

** Utilizado para as intensidades Tme, Tme1, Tme2

4.6.9 Análise econômica

Para análise econômica foram considerados os investimentos na adaptação de máquinas e implementos, aquisição de receptor GNSS, sinal de GNSS pago e mão de obra pela prestação do serviço do projeto das linhas de tráfego. Não foi necessária a aquisição de novos maquinários, assim o produtor não precisou investir em equipamento específico para utilização no TC.

O valor total investido nas adaptações foi convertido para cotação do dólar (US$1,00 = R$ 3,7569) do dia 2 de agosto (UOL, 2018), com referência na cotação

do saco da soja de R$73,50, para o mesmo dia, no município de Carazinho – RS (AGROLINK, 2018).

Através da produtividade de soja acumulada nas três safras, foi calculada a receita bruta para 89 ha e para 1 ha, para cada tipo de tráfego TT, TC e TAA. Para rentabilidade, TAA e TC foram comparados com o tratamento TT, considerado como referência, por não requerer investimentos.

O retorno do investimento foi calculado pelo método do payback simples, determinando-se em quanto anos/safras os investimentos estarão pagos. A propriedade produz cultura comercializável apenas no verão (soja). Não foi utilizada a cultura da aveia no cálculo, devido a mesma ser planta de cobertura.

5. ESTATÍSTICA

O modelo estatístico considerado foi um modelo misto, no qual o efeito tráfego, camada e a interação tráfego X camada foram tratadas como efeito fixo. E o efeito da intensidade de tráfego, do tratamento dentro da faixa [tráfego(faixa)], e da camada dentro da interação faixa x tráfego [camada (faixa x tráfego)] foram considerados como efeitos aleatórios.

A normalidade e distribuição dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Quando os dados não foram normais utilizou-se a função Box-Cox (VENABLES; RIPLEY, 2002). A comparação das médias foi realizada com base na análise de variância (ANOVA), foi aplicado o teste de Tukey a nível de significância $p < 0,05$ para o cálculo das diferenças das significâncias. A avaliação dos dados foi realizada no software R (R CORE TEAM, 2018). Para o Artigo 1 também foi realizada uma Análise Discriminante de Componentes Principais (ADCP). Já no Artigo 2 foi realizada uma análise de redundância (RDA) foi utilizada para verificar a fração de explicação das variáveis de propriedades de solo sobre o comprimento radicular nas classes de diâmetro estabelecidas e produtividade da cultura da soja. A RDA é composta por uma regressão linear múltipla seguida por uma análise de componentes principais (PCA), onde a resposta s e dá na matriz.

6. ARTIGO 1 – AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO E A PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE SOJA SOB DIFERENTES INTENSIDADES DE TRÁFEGO AGRÍCOLA

6.1 RESUMO

A compactação do solo é um limitante para o desenvolvimento das culturas sob plantio direto (PD). Por isso, é necessário adotar medidas que reduzam o problema que geralmente está vinculado ao tráfego de máquinas agrícolas. Com isso o objetivo desse trabalho foi avaliar as alterações nas propriedades físicas, infiltração de água e produtividade da soja e massa seca da aveia, submetidas a diferentes tipos de tráfego e intensidades manejadas sob PD. O estudo foi conduzido em uma área comercial de 89ha no município de Carazinho, RS, manejada sob PD por cerca de 20 anos, em um Latossolo Vermelho Distrófico Típico. Os tratamentos foram constituídos pelos tipos de tráfego tradicional (TT), tráfego controlado (TC) e tráfego alternado anual (TAA). Para tipos de tráfegos aplicam-se as intensidades: Sem tráfego (ST), tráfego médio (Tme, Tme1 e Tme2) e tráfego máximo (Tma, Tma1, Tma2). Foram avaliados parâmetros físicos de densidade (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT) do solo, taxa de infiltração de água – produtividade de soja em 3 safras (de 2015 a 2018), e a massa seca da aveia em 2017. A infiltração acumulada foi superior em 19,6 vezes para tratamento TC ST, e 21,7 vezes para tratamento TAA ST, quando comparadas a infiltração nos tratamentos de Tma. Foram verificados incrementos produtivos na cultura da soja na ordem de 20,2% para os tratamentos TC ST, TAA ST, TAA Tma1 e TAA Tme1 para a safra 2016/17. Para aveia o tratamento mais produtivo (TAA ST) representou 21,3 % de incremento. Conclui-se que a adoção do tráfego controlado proporciona melhoras na estrutura física do solo, aumenta a infiltração de água acumulada e propicia incremento produtivo.

Palavras-chave: Tráfego controlado. Compactação do solo. Plantio direto.

6.2 ABSTRACT

EVALUATION OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF A TYPIC HAPLUDOX AND SOYBEAN SEED YIELD UNDER DIFFERENT TYPES OF AGRICULTURAL TRAFFIC

Soil compaction is a limiting factor for the development of crops under the no-tillage system (NT), therefore measures aimed to reduce this problem often associated with agricultural machinery is necessary. Thus, the objective of this study was to evaluate the alterations in the physical properties, water infiltration, soybean seed yield and aboveground dry mass production (ADMP) of oat, subjected to different types of agricultural traffic and intensities managed under a NT system. The study was conducted in an 89 ha field (on-farm research), in the municipality of Carazinho, RS, where Typic Hapludox soil has been managed under a NT system over the last 20 years. The levels of traffic were categorized into three types: traditional traffic (TT), controlled traffic (CTF), and annual alternate traffic (AAT). The intensities of the traffic were: without traffic (WT), medium traffic (Tme, Tme1, Tme2), and maximum traffic (Tma, Tma1, Tma2). Soil was evaluated for soil bulk density, macroporosity,

microporosity, total porosity, penetration resistance, and soil water infiltration rate. Soybean seed yield was evaluated during three growing seasons, from 2015 to 2018, and oat ADMP in 2017. Findings show that the accumulated infiltration was higher for the WT CTF and the WT AAT treatment by 19.6 and 21.7 times, respectively, in comparison to the reference Tma treatment. A 20.2% productivity increase was observed in the soybean seed yield for the treatments CTF WT, AAT WT, AAT Tma1 and AAT Tme1 during the growing seasons 2016 and 2017. Increase of 21.3% in oat ADMP were observed for the AAT ST treatment. The adoption of controlled traffic in farming provided improvements in the physical structure of the soil, an increase in the accumulated infiltration and a rise in productivity.
Keywords: Controlled traffic farming. Soil compaction. No-tillage.

6.3 INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil maneja mais de 32 milhões de hectares sob sistema plantio direto (SPD) (MOTTER *et al.*, 2015), considerado um sistema conservacionista que protege o solo contra erosão (SILVA & DE MARIA, 2011) e ambientalmente correto por promover a fixação de carbono no solo (AMADO *et al.*, 2001). Cerca de 57 % da área de cultivo, no Brasil, na safra 2017/18 foi com a cultura da soja, ou seja 35,2 milhões de hectares (CONAB, 2018). O Brasil produz atualmente a média de 3.385 kg ha^{-1} de grãos de soja e é considerado o 2º maior produtor da oleaginosa no mundo. Os Estados Unidos da América (EUA) é o maior produtor e cultiva 36,23 milhões de hectares, com média produtiva de 3.333 kg ha^{-1} (USDA, 2018b).

Embora a adoção ao SPD seja alta no país, apenas uma pequena parte dos agricultores adotam todos os conceitos preconizados para o sistema, em torno de 2,7 milhões de hectares (MOTTER *et al.*, 2015). A rotação, consorciação e diversificação de espécies fazem parte dos conceitos do SPD (NUNES *et al.*, 2015). A sucessão de diferentes espécies contribui para redução de inóculos, como a redução da severidade das doenças que atacam o sistema radicular (SANTOS *et al.*, 2000). O consórcio entre gramíneas e leguminosas é uma das melhores estratégias para obter os benefícios das culturas, como diferentes sistemas radiculares, que fixam nitrogênio e que ciclam nutrientes (FAGERIA *et al.* 2005). As plantas que descompactam o solo como nabo forrageiro possuem potencial para romper as camadas compactadas do solo (NICOLOSO *et al.*, 2008), sendo excelente alternativa para criar bioporos estáveis no solo (CUBILLA *et al.*, 2002).

O SPD está exposto a pequenas mobilizações oriundas da ação da semeadura, atividade biológica e desenvolvimento radicular, enquanto a compactação proveniente

do tráfego de máquinas persiste por muitos anos (TULLBERG *et al.*, 2018). Os efeitos da compactação sobre a resistência a penetração, desenvolvimento das culturas e produtividade das culturas costumam ficar mascarados quando ocorrem chuvas em quantidades adequadas. Entretanto, quando ocorre déficit hídrico o efeito se torna severo (CHAMEN, 2011). A compactação exerce efeito direto no crescimento e desenvolvimento das culturas, associado a redução da absorção de água e nutrientes (ANTILLE *et al.,* 2016).

A palha tem um papel de proteção e amortecimento dos impactos sobre o solo. Os tratos culturais, a rotação de culturas e adequada fertilidade propiciam a manutenção da proteção. A deformação que o peso das máquinas e implementos realizam nas atividades agrícolas é amortecido pela palha sobre o solo (BRAIDA *et al.*, 2006). No entanto locais mal manejados reduzem a palha sobre o solo, somados ao intenso tráfego e o fato de ocorrer revolvimento apenas no sulco de semeadura (o que faz com que a estrutura do solo não seja alterada), a compactação do solo está propícia a se estabelecer nesses locais.

O deslocamento dos implementos, em umidades inadequadas, favorece a compactação (SILVA *et al.*, 2006), ocorrendo também pela falta de planejamento das atividades e o aumento do número de passadas. As passadas necessárias para as semeaduras, pulverizações e colheitas durante a sucessão de culturas ocorrem de forma aleatória. Passadas ocasionais acabam compactando a área em sua totalidade, resultando que poucas atividades deixam rastros dos implementos em toda superfície do solo (KROULÍK *et al.*, 2009).

O maquinário, nas últimas décadas, teve aumento do peso e tamanho (SIVARAJAN *et al.*, 2018; TREIN *et al.*, 2009), o que influencia no rendimento operacional. Entretanto, a capacidade de compactar o solo aumentou devido a área de contato dos pneus ter sido pouco alterada. A dissipação do peso ocorre por uma relação área X peso, quanto maior a área e menor o peso, menor será o efeito da passagem desse implemento sobre o solo. O pulverizador que utiliza pneus estreitos com pequena área de contato para reduzir o amassamento das culturas estabelecidas, acaba sendo um dos principais compactadores do solo.

A compactação originada pelas máquinas e implementos é variada, podendo ser intensificada dependendo do tipo de pneu e pressão interna utilizadas (MACHADO *et al.*, 2014), fazendo com que nestes locais a dissipação do peso compacte o solo. Pode-se trabalhar com pressões menores dos pneus para aumentar a área de contato

e assim reduzir a tensão sobre o solo e diminuir a probabilidade de compactar (MION *et al.*, 2016).

Ferramentas para o gerenciamento do tráfego das máquinas são alternativas para controlar a compactação de áreas específicas da lavoura (TULLBERG *et al.*, 2007), essa tecnologia é conhecida como tráfego controlado. Esse sistema planeja as linhas de tráfego e nesses locais pré-determinados ocorre o deslocamento das máquinas e implementos (TULLBERG *et al.*, 2007). Esse sistema apresenta uma série de benefícios como maior eficiência do uso da água, redução de combustível, redução das distâncias percorridas e menor potência requerida para as atividades (GIRARDELLO *et al.*, 2014). Além dos benefícios agronômicos e econômicos que o TC proporciona, há benefícios ambientais como a redução da emissão de gases como N_2O e CH_4 de 30 a 50% (TULLBERG, *et al.*, 2018), devido a redução da lixiviação de nitrogênio e emissão de gás carbônico para atmosfera (CHAMEN *et al.*, 2015).

Este estudo, realizado no sul do Brasil, avaliou os efeitos da implantação de diferentes tipos de tráfego de máquinas sobre as características físicas de um Latossolo Vermelho distrófico típico, e respostas sobre a produtividade de grãos de soja e massa seca da aveia.

6.4 MATERIAL E MÉTODOS

6.4.1 Local

O experimento foi conduzido em uma área comercial de 89 ha no município de Carazinho, Rio Grande do Sul - Brasil. Localizado na zona 22J 336043 m E 6875204 m S e 600 m de altitude. O clima local é do tipo Cfa, clima temperado húmido com verão quente (ALVARES et al., 2013), e precipitações pluviais médias anuais de 1856mm (EMBRAPA, 2012). A análise dos atributos químicos e textura do solo do local do experimento estão apresentados na Tabela 1. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico de acordo com o sistema brasileiro de classificação dos solos (SIBCS) (SANTOS *et al.*, 2013).

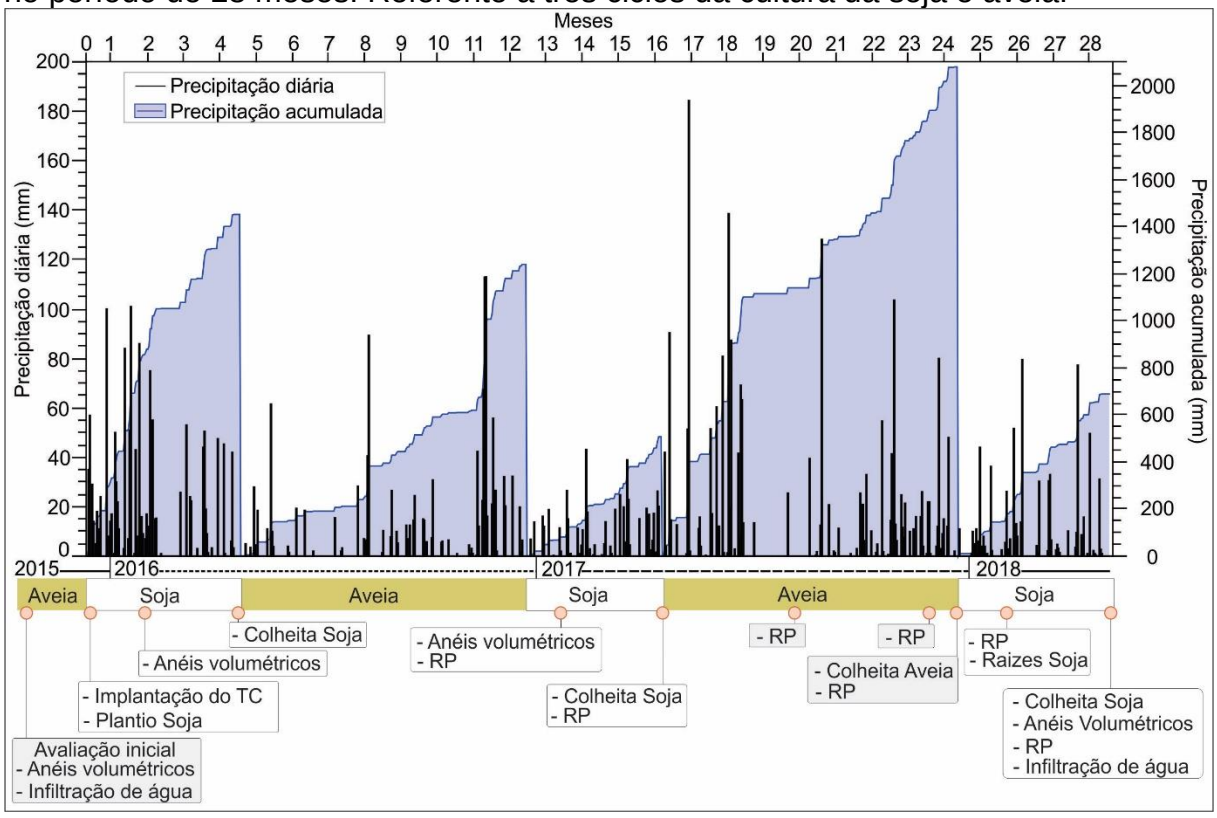
Tabela 1. Atributos químicos e físicos avaliados no período de florescimento da soja. Carazinho-RS.

Camada (m)	Argila	Silte	Areia	pH	Al	$CTC_{(T)}$	Ca	Mg	K	V	P
	g kg^{-1}			H_2O	$cmol_c$ dm^{-3}					%	mg dm^{-3}
0 - 0,05	300,4	283,6	416,1	5,4	0	16,9	8,2	2,9	139,5	67,8	33,5
0,05 - 0,10	334,4	265,2	400,3	5,0	0,4	16,5	6,2	2,4	79,7	53,0	17,7
0,10 - 0,15	347,6	271,3	381,1	4,9	0,4	16,1	5,3	2,3	50,2	48,1	13,1
0,15 - 0,20	353,4	280,1	366,4	4,8	0,8	16,8	4,9	2,3	41,1	43,7	7,0
0,20 - 0,30	362,6	289,4	348,0	4,7	1,0	16,6	3,8	2,2	31,6	37,2	3,3
0,30 - 0,40	397,8	273,6	328,7	4,6	1,1	16,4	3,1	2,1	25,0	33,4	2,0

As fertilizações e tratos culturais foram os mesmos que o produtor utilizou na propriedade, sendo adotado em todos os tratamentos. As culturas avaliadas foram a soja (*Glycine max* (L) Merrill) e aveia (*Avena strigosa* Schieb.). A cultura da soja foi semeada nos meses de novembro (2015, 2016 e 2017) com população estabelecida de 7 plantas por metro linear e espaçamento entre fileiras de 0,34 m, totalizando 200 mil plantas ha^{-1}. A fertilização de Mono-Amônio-Fosfato (MAP 11-52-00) foi realizada no momento da semeadura, na dose média de 120 kg ha^{-1}. Em cobertura, foi aplicado cloreto de potássio (KCl 60 %) na dose média de 130 kg ha^{-1}. A cultura da aveia foi implementada nos meses de abril (2016 e 2017), com aproximadamente 80 kg ha^{-1} de sementes, com espaçamento de 0,17 m, fertilizadas com 60 kg ha^{-1} de Mono-Amônio-Fosfato (MAP 11-52-00). Para determinação da produtividade da soja, foram coletados manualmente 3,0 m lineares de uma fileira em cada local. Essas avaliações foram repetidas 5 vezes, em cada bloco, para cada tratamento. A área coletada em cada parcela foi de 1,02 m^2, sendo as vagens debulhadas, pesadas, com umidade corrigida para 13% e produtividade convertida a kg ha^{-1}. Para avaliação da massa seca da aveia foram coletadas 2 linhas de 1,0m, repetidas 4 vezes, em cada tratamento. Após as amostras foram secas e convertidas para kg ha^{-1}.

Os dados pluviométricos foram registrados através de 4 estações localizadas nas unidades de gerenciamento da cooperativa Cotrijal®, próximas à área do experimento, os quais estão disponíveis gratuitamente pelo acesso ao site da web da cooperativa (COTRIJAL, 2018). Foram atribuídos pesos às amostras, para compor a média, de acordo com a distância: estação 1 (50%), estação 2 (25%), estações 3 e 4 (12,5%). Os registros de precipitação diária, precipitação acumulada, e dias das avaliações e coletas a campo, estão apresentados na Figura 1.

Figura 1. Linha do tempo das atividades realizadas, precipitação diária e acumulada no período de 28 meses. Referente a três ciclos da cultura da soja e aveia.



Tráfego controlado (TC), Resistência a penetração do solo (RP).

6.4.2 Equipamentos utilizados

O tráfego controlado foi adotado em novembro de 2015, sendo implantadas a cultura da soja no verão, durante as safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18, e aveia como planta de cobertura no inverno. O manejo das culturas, fertilizações e pulverizações dos tipos de tráfego foi idêntico, sendo utilizados os mesmos implementos para as atividades na área de 89 ha. Os implementos possuem dimensões de trabalho de 9,0 m para trator/semeadora e colhedora, já o pulverizador 27,0 m. As bitolas apresentam pequenas diferenças entre os implementos, contudo o rastro deixado pelos pneus foi coincidente devido a largura dos maiores pneus sobrepor o rastro dos pneus de menor largura. Para o correto direcionamento das máquinas, foi utilizado o sistema de piloto automático Trimble EZ-Pilot para trator e colhedora. A correção do sinal GNSS foi realizada pelo sistema CenterPoint® RTX Trimble, que utiliza o sinal pago de satélites estacionários que enviam dados para o monitor realizar a correção.

O trator utilizado para realização das semeaduras foi um Massey Ferguson modelo MF 7415 Dyna-6, com potência no motor de 215 CV e aproximadamente

~7000 kg eixo^{-1} com lastros. A bitola (distância do centro de um pneu a outro no mesmo eixo) dianteiro e traseiro, adaptados para dimensão de 3,05 m, os pneus utilizados no eixo dianteiro eram de 18,4” de aro 26”, e no eixo traseiro 30,50” de aro 32”.

Foram utilizadas duas semeadoras Semeato, modelo SSM 27, com largura de trabalho de 4,5 m cada. Esse modelo possui opções de regulagem do espaçamento das linhas possibilitando o melhor ajuste para grãos finos e grossos. Para utilização das duas semeadoras foi utilizado um cabeçalho tandem. As plantadeiras ficavam desencontradas, a primeira cerca de 3 metros à frente da segunda. O tandem continha pistões hidráulicos que realizavam a correção do alinhamento das plantadeiras, evitando áreas com sobreposição ou falhas na lavoura.

A regulagem para grãos finos (aveia) era realizada para implementar a cultura no inverno, sendo regulada para as linhas ficarem espaçadas em 0,17 cm, cada plantadeira possuía 27 linhas, totalizando 54 linhas no conjunto. Em cada semeadora foram utilizados 24 discos duplos de 0,406 e 0,381 m, junto com 3 discos de 0,70 m e 3 sulcadores do tipo hastes alinhados com os pneus do trator. Com isso, foi realizado uma escarificação nas linhas de tráfego pelos discos de 0,70 e sulcadores. Os registros do penetrômetro verificaram a ação desse conjunto até 0,23 m. Essa configuração de discos duplos mais a haste sulcadora, foi utilizada apenas na implantação da cultura de cobertura do inverno. Um estudo verificou que a utilização dessa configuração gerou maior patinagem (3,85%), demanda maior potência (65 kW) e utilização (41,1%) do motor do trator quando comparado a utilização de somente os discos duplos (BERTOLLO *et al.*, 2018).

As semeadoras foram reguladas para trabalhar em espalhamento de 0,34 entre linhas, na regulagem para grãos grossos realizada para implementar a cultura de verão (soja). Cada semeadora continha 13 linhas discos duplos de 0,406 e 0,381 m e, no conjunto, eram realizadas as semeaduras de forma simultânea nas 26 linhas dos 9m de largura de trabalho.

O pulverizador utilizado foi da marca JAN, modelo Power Jet 2500 4x4, barras de aplicação dianteiras, potência no motor de 130 CV e aproximadamente ~4500 kg eixo^{-1} carregado. A dimensão da bitola dos eixos de 2,74m, utilizando pneus 12,40” de aro 36” em ambos os eixos. As barras originais de 24,0 m foram adaptadas e alongadas para a largura de trabalho de 27 m.

A colhedora utilizada foi uma Case IH, modelo 2388 Axial-Flow, potência no motor de 284 CV e aproximadamente ~12600 kg eixo^{-1} com plataforma de corte e grãos. A colhedora era equipada com pneus 30,5” de aro 32” no eixo dianteiro e 14,9” aro 24” no eixo traseiro, a bitola em ambos os eixos media 3,05 m. A plataforma de corte para colheita possuía largura de trabalho de 9 m, a colhedora contava com o conjunto de monitores AFS (*Advanced Farming System*) os quais contem sensores de produtividade e umidade dos grãos. O tubo de descarga dos grãos que originalmente media 5,5 m foi alongado para 7,5 m, possibilitando assim a descarga de grãos no graneleiro na linha paralela ao deslocamento.

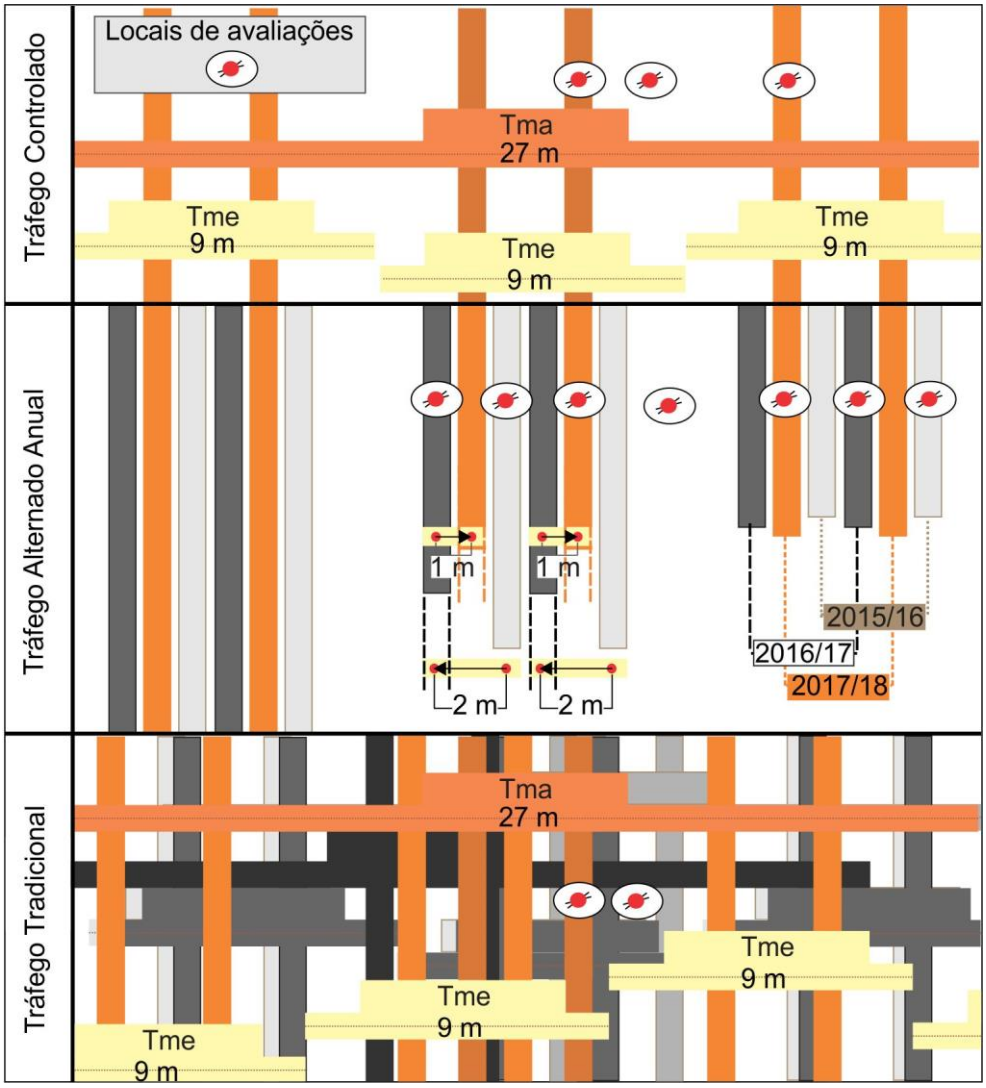
6.4.3 Desenho experimental e tratamentos

O delineamento foi planejado seguindo uma estrutura hierárquica de maneira que o primeiro nível foi composto por faixas contendo os tratamentos [tipo de tráfego (intensidade de tráfego)], dentro de cada faixa foram feitas as repetições. E dentro de cada repetição foram analisadas seis profundidades.

As faixas em seu primeiro nível de fator possuem os tratamentos: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). O segundo nível do fatorial apresenta as intensidades de tráfego: sem tráfego (ST), tráfego médio (trator) (Tme) e tráfego máximo (trator + pulverizador) (Tma).

O tráfego TAA se caracteriza pelos deslocamentos planejados das linhas de tráfego do Tme e Tma dois metros entre na cultura da aveia em 2016, e um metro em 2017 também na cultura da aveia (Figura 2). assim foram criados mais quatro tratamentos de intensidade de tráfego Tma1, Tme1, Tma2 e Tme2, os números 1 e 2 desses tratamentos indicam o tempo (anos) que foram realizados os deslocamentos das linhas de tráfego.

Figura 2. Disposição a campo do deslocamento dos implementos e das linhas de tráfegos.



TC – Tráfego controlado, TAA – Tráfego alternado anual, TT – Tráfego tradicional. Para TAA, cor cinza representa as linhas de tráfego da safra 2015/16, preto safra 2016/17 e laranja safra 2017/18 para cultura da soja e aveia. As larguras de trabalho dos implementos: pulverizador (Tma) 27 m, e trator/colhedora (Tme) 9 m. Os símbolos (elipses com círculo vermelho) indicam os locais de coleta e avaliação representados para os três tipos de tráfego.

6.4.4 Avaliações a campo e análises laboratoriais

Anéis volumétricos foram coletados para determinação de densidade do solo (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) (EMBRAPA, 2011). Os anéis utilizados para a coleta de solo possuíam as dimensões de 0,04 m de altura e 0,06 m de diâmetro. Utilizou-se para determinação da macroporosidade a tensão de -6 kPa, para microporosidade as amostras foram para a estufa onde permaneceram por 48 h a 105°C. As avaliações ocorreram em 4 períodos, caracterização inicial (novembro 2015), aos 3 meses no florescimento da

soja (janeiro 2016), aos 14 meses no florescimento da soja (fevereiro 2017), e aos 28 meses após a colheita mecanizada (abril 2018).

Foram considerados para todas avaliações as profundidades do perfil do solo dividido em 6 camadas: 0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15; 0,15 – 0,20; 0,20 – 0,30; 0,30 – 0,40 m. Os locais (blocos) de coleta foram estabelecidos nas faixas de deslocamento acordo com o tipo de tráfego estabelecido, sendo dispostos de maneira que ocorresse a casualização e representação da variabilidade da área.

As avaliações de resistência a penetração do solo (RP) foram realizadas em 7 períodos: aos 14, 16, 20, 23, 24, 26 e 28 meses após a implementação do TC. As avaliações de RP foram realizadas com o penetrômetro SoloTrack (PLG5300) Falker. Os registros ocorrem através de uma célula de carga, por intermédio da inserção da haste é automatizada a velocidade nominal de inserção de 0,024 m s^{-1}. Foi utilizado cone tipo 2 (diâmetro de 12,83 mm), com ângulo 30° (ASAE, 1976), a configuração do equipamento utilizada para registrar leituras a cada 0,01 m, da superfície do solo até a profundidade de 0,40 m. As avaliações foram repetidas 5 vezes em cada local para cada tratamento (intensidade de tráfego), e coletado solo para determinação da umidade em cada profundidade.

O solo foi coletado para análise química no período do florescimento da cultura da soja, no ano de 2018. A metodologia para a análise química de solo foi realizada conforme Tedesco *et al.* (1995), as determinações químicas foram: pH em água (1:1 solo-água), teor de alumínio (Al^{3+}) extraído com KCl 1 mol L^{-1} e titulado com NaOH 0,0125 mol L^{-1}, cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) extraídos com KCl 1 mol L^{-1} e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, fósforo (P) e potássio (K^{+}) extraídos com solução de Mehlich-I. A concentração de P foi determinada por colorimetria usando molibidato de amônio e o teor de K^{+} foi determinado por fotometria de chama. A determinação da textura do solo seguiu a metodologia descrita por Embrapa (2017), onde foram determinadas a proporções de argila, silte e areia.

A determinação infiltração de água no solo foi realizada em dois momentos: na caracterização inicial da área (novembro de 2015), e após a colheita mecanizada (28 meses após a implantação do TC, abril de 2018). Sendo utilizada a metodologia descrita por Embrapa (1979), a qual se utiliza dos duplos anéis concêntricos para avaliação. As leituras foram realizadas nos tempos 0, 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 75 e 90 minutos após o início do teste. Após, os registros de infiltração foram

transformados em velocidade (VI) e acumulado de infiltração (I) (mm h^{-1} e mm), pelo modelo empírico de Kostiakov (BERNARDO et al., 2006).

A área trafegada por cada intensidade de tráfego foi determinada pelos rastros pneus dos implementos deixavam no solo para os tráfegos TC e TAA. O tráfego TT foi estipulado pelos dados de Kroulík *et al.* (2009), onde 55,7% da área recebe o contato dos pneus sobre o solo em apenas uma safra quando é utilizado o tráfego tradicional (TT) sob plantio direto (PD).

- Para TC: ST (85,5 %), Tma (5,3 %), Tme (9,2 %);
- Para TAA 2015/16: ST (85,5 %), Tma (5,3 %), Tme (9,2 %);
- Para TAA 2016/17: ST (71,0%), Tma (5,3 %), Tma1 (5,3 %), Tme (11,48 %), Tme1 (9,2 %);
- Para TAA 2017/18: ST (46,4 %), Tma (5,3 %), Tma1 (5,3 %), Tma2 (5,3 %), Tme (9,2 %), Tme1 (9,2 %), Tme1 (9,2 %);
- Para TT 2015/16: ST (44,3 %), Tma (5,3 %);
- Para TT 2016/17: ST (33,6 %), Tma (5,3 %);
- Para TT 2017/18: ST (23,0 %), Tma (5,3 %).

A área ST poderia ser aumentada utilizando equipamentos com maior largura de trabalho utilizando equipamentos com 10 e 30 m ou 12 e 36 m, por exemplo. Para Tullberg (2010) o tráfego controlado em projetos ideais destinam até 15 % da área para as linhas de tráfego.

6.4.5 Estatística

O modelo estatístico considerado foi um modelo misto onde o efeito tráfego, camada e a interação tráfego X camada foram tratadas como efeito fixo. E o efeito da intensidade de tráfego, do tratamento dentro da faixa [tráfego(faixa)], e da camada dentro da interação faixa x tráfego [camada (faixa x tráfego)] foram considerados como efeitos aleatórios.

A normalidade e distribuição dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Quando os dados não foram normais utilizou-se a função Box-Cox (VENABLES; RIPLEY, 2002). A comparação das médias foi realizada com base na análise de variância (ANOVA), foi aplicado o teste de Tukey a nível de significância $p < 0,05$ para o cálculo das diferenças das significâncias. A avaliação dos dados foi realizada no

software R (R CORE TEAM, 2018). Também foi realizada uma Análise Discriminante de Componentes Principais (ADCP).

6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de variância (ANOVA) das comparações de médias, para os níveis de significância (*P*) e valores de Fisher (F).

Tabela 2. Resumo ANOVA. Valores de Fisher (F) e níveis de significância (*P*) para intensidade de tráfego, camada e interação entre tráfego x camada para resistência a penetração mecânica do solo, anéis volumétricos, infiltração, e produtividade.

Avaliação			Trafego Intensidade		Camada		Trafego x Camada	
			F	*P*	F	*P*	F	*P*
Resistência a Penetração		14	0,368	ns	139,412	***	1,290	ns
		16	1,772	ns	141,418	***	2,302	**
		20	2,272	ns	74,840	***	1,107	ns
		23	0,775	ns	172,614	***	0,700	ns
		24	4,330	***	490,134	***	1,357	ns
		26	1,919	ns	331,346	***	2,158	***
		28	5,339	***	632,629	***	4,503	***
Anéis Volumétricos	0	DS	-	-	-	-	-	-
		Micro	-	-	-	-	-	-
		Macro	-	-	-	-	-	-
		PT	-	-	-	-	-	-
	3	DS	1,074	ns	16,550	***	0,769	ns
		Micro	0,548	ns	15,472	***	1,560	ns
		Macro	0,758	ns	5,538	***	0,723	ns
		PT	1,113	ns	23,048	***	0,802	ns
	14	DS	1,161	ns	94,592	***	2,986	***
		Micro	1,955	ns	7,125	***	1,253	ns
		Macro	4,464	**	39,710	***	3,287	***
		PT	1,409	ns	72,698	***	2,515	ns
	28	DS	0,996	ns	70,531	***	2,925	***
		Micro	2,530	*	45,393	***	1,520	*
		Macro	3,915	**	48,949	***	4,281	***
		PT	1,872	ns	80,026	***	3,659	***
Infiltração[1]		Taxa	19,322	***	180,196	***	9,338	***
		Acumulado	23,135	***	102,807	***	10,835	***
Produtividade		Soja (15/16)	4,192	*	-	-	-	-
		Soja (16/17)	2,397	*	-	-	-	-
		Aveia (17)	3,351	***	-	-	-	-
		Soja (17/18)	1,333	ns	-	-	-	-

[1]Para avaliação de infiltração considerar tempo (min) ao invés de camada. Níveis de significância: *** P < 0,001; ** P < 0,01; * P < 0,05; não significativo (ns) P > 0,05.

6.5.1 Resistência mecânica do solo a penetração (RP)

Avaliações realizadas a partir do florescimento da cultura da soja safra 2016/17, aveia 2017 e soja 2017/18 apresentam grande variabilidade, tanto nas camadas do perfil do solo, como também entre os tratamentos. A menor umidade foi verificada na avaliação aos 14 meses (Tabela 3), na qual foi registrado a maior média. Grandes variações da RP são atribuídas ao teor de água no solo, a RP e a umidade do solo apresentam elevada correlação negativa (SILVEIRA *et al.*, 2010).

Tabela 3. Média da resistência a penetração do solo (RP) para cada avaliação realizada.

Avaliação	Mês do ano	Ano	Cultura	Média RP (Mpa)	Umidade do solo (g g^{-1})*
14	Janeiro	2017	Soja	2,97	0,20
16	Março	2017	Soja	1,59	0,26
20	Julho	2017	Aveia	1,89	0,26
23	Novembro	2017	Aveia	1,45	0,21
24	Novembro	2017	Soja	1,37	0,23
26	Fevereiro	2018	Soja	1,72	0,23
28	Abril	2018	Soja	1,43	0,27

*g g^{-1} – teor de água no solo com base no peso seco.

Observações de RP maiores que 2,0 MPa são consideradas altas (ARSHAD *et al.*, 1996), prejudicando substancialmente o crescimento das raízes das plantas nesses locais (REYNOLDS *et al.*, 2002). A RP em 3,5 MPa apresenta restrição ao desenvolvimento da soja, influenciando negativamente a produtividade da cultura (GIRARDELLO *et al.*, 2014). Um sistema radicular que explore um solo com menor compactação, não necessitará gastos extras de energia para romper camadas compactadas. Já em um solo mais compactado, ficará restrito às camadas superiores, em função do impedimento físico.

Na Tabela 2, pode ser observado que na primeira avaliação não houve diferença entre os tratamentos. Esses dados, a partir da camada 0,05 m, apresentavam, em todos os tratamentos, registros acima de 2,0 MPa, sendo considerado de alta resistência para o desenvolvimento de plantas (ARSHAD *et al.*, 1996; REYNOLDS *et al.*, 2002). Já na avaliação realizada pós colheita (após 16 meses) houve diferença, o teste de Tukey é apresentado na Tabela 4. O tratamento TC Tme apresenta a maior média entre os tratamentos (1,70 Mpa) para o perfil analisado (0 – 0,40 m). Quando se observa a camada 0,05 – 0,10 m os tratamentos

TC ST e TAA ST apresentam RP menor que 1,0 Mpa, já os tratamentos com das linhas de tráfego TC Tma e Tme são 90 e 105 % superiores, como era de se esperar devido a concentração do tráfego dos implementos. Ao observar os tratamentos ST, o TT ST apresenta 119, 48, 26 e 14% RP superior aos tratamentos TC ST e TAA ST para as camadas 0 – 0,05, 0,05 – 0,10, 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m, respectivamente. Para as camadas 0,20 – 0,30 e 0,30 –0,40 m não houve o efeito do tráfego para diferenciar os tratamentos.

Tabela 4. Avaliações de resistência a penetração do solo nas diferentes intensidades de tráfego.

Avaliação	Camada (m)	TC			TAA							TT	
		ST	Tma	Tme	ST	Tma	Tma1	Tma2	Tme	Tme1	Tme2	ST	Tma
		MPa											
16	0 - 0,05	0,25 A	0,71 A	0,82 A	0,25 A	0,61 A	-	-	0,80 A	-	-	0,55 A	0,54 A
	0,05 - 0,10	0,89 BC	1,60 AB	1,73 A	0,79 C	1,34 ABC	-	-	1,56 AB	-	-	1,25 ABC	1,19 ABC
	0,10 - 0,15	1,26 AB	1,83 AB	1,89 A	1,17 B	1,52 AB	-	-	1,72 AB	-	-	1,52 AB	1,68 AB
	0,15 - 0,20	1,86 A	2,07 A	1,87 A	1,61 A	1,84 A	-	-	1,97 A	-	-	1,98 A	2,11 A
	0,20 - 0,30	1,93 A	1,86 A	1,86 A	2,19 A	1,74 A	-	-	1,96 A	-	-	2,15 A	2,17 A
	0,30 - 0,40	2,08 A	2,02 A	2,04 A	2,61 A	1,99	-	-	2,1 A	-	-	2,34 A	2,23 A
26	0 - 0,05	0,40 A	0,83 A	0,42 A	0,50 A	0,82 A	0,70 A	0,54 A	0,52 A	0,39 A	0,50 A	0,47 A	1,06 A
	0,05 - 0,10	1,55 BC	1,96 AB	1,73 BC	1,47 BC	1,76 BC	1,84 ABC	1,80 BC	1,90 ABC	1,17 C	1,53 BC	1,95 AB	2,59 A
	0,10 - 0,15	1,98 A	1,86 A	1,99 A	1,63 A	1,81 A	1,57 A	2,00 A	1,85 A	1,52 A	1,89 A	1,99 A	2,14 A
	0,15 - 0,20	2,20 A	2,05 A	2,30 A	1,97 A	2,02 A	1,91 A	2,23 A	1,78 A	1,82 A	1,99 A	1,95 A	2,08 A
	0,20 - 0,30	2,17 A	2,09 A	2,19 A	2,02 A	1,86 A	2,12 A	2,06 A	2,08 A	2,05 A	2,06 A	2,07 A	2,08 A
	0,30 - 0,40	2,15 A	2,15 A	2,26 A	1,91 A	1,74 A	1,87 A	1,84 A	2,16 A	1,98 A	2,06 A	2,07 A	2,03 A
28	0 - 0,05	0,28 A	0,77 A	0,38 A	0,30 A	0,75 A	0,34 A	0,35 A	0,35 A	0,33 A	0,33 A	0,32 A	0,61 A
	0,05 - 0,10	1,06 CD	1,99 A	1,31 BCD	1,08 CD	1,71 AB	0,76 D	1,31 BCD	1,20 BCD	0,99 CD	1,03 CD	1,14 BCD	1,56 ABC
	0,10 - 0,15	1,68 A	1,88 A	1,75 A	1,37 ABC	1,63 AB	0,85 C	1,64 AB	1,50 AB	1,06 BC	1,39 ABC	1,44 AB	1,69 A
	0,15 - 0,20	1,98 A	1,90 AB	1,84 AB	1,65 AB	1,74 AB	1,32 B	1,87 AB	1,75 AB	1,57 AB	1,66 AB	1,74 AB	1,77 AB
	0,20 - 0,30	1,81 A	1,76 A	1,88 A	1,72 A	1,72 A	1,69 A	1,91 A	1,78 A	1,89 A	1,75 A	1,85 A	1,76 A
	0,30 - 0,40	1,91 A	1,96 A	2,22 A	1,75 A	1,75 A	1,83 A	1,76 A	1,83 A	1,91 A	1,90 A	2,02 A	1,99 A

Avaliações 16 e 28: colheita da soja; avaliação 26: florescimento da soja. Letras maiúsculas diferentes nas linhas indicam diferente significância para intensidade de tráfego x camada (*P* < 0,05; Tukey).

Nas avaliações realizadas aos 20 e 23 meses, durante o desenvolvimento e colheita da aveia, não houve diferença entre os tratamentos, quando foi considerado os tráfegos e tráfego x camada. Para a avaliação aos 24 meses, realizada no plantio da soja, os tratamentos apresentaram diferença entre os tipos de tráfegos. O tratamento com menor média do perfil de RP foi TAA Tme2 (1,2 Mpa), seguido dos tratamentos que não possuem tráfego TT ST, TC ST e TAA ST. A média para todos os tratamentos apresentam valores abaixo de 1,64 MPa. Para Beutler et al. (2008) a faixa de 1,64 a 2,35 MPa é prejudicial e reduz a produtividade da soja.

No florescimento da soja, os resultados da avaliação (26 meses) se diferenciaram estatisticamente. O tratamento TT ST com RP de 1,9 MPa foi o mais alto registro para camada 0,05 – 0,10m entre os que não possuem tráfego. Na camada

0,10 – 0,15m, os tratamentos TAA Tma1 e Tme1 apresentam os menores valores de RP (1,5 MPa), já TAA Tma2 e Tme2 apresentam RP mais elevada 2 e 1,9 MPa, respectivamente. Tal efeito também é percebido em outras camadas, o que demonstra que o efeito do sulcador não se mantém. Nesta avaliação, alguns locais com tráfego máximo Tma apresentaram registros semelhantes ou inferiores a locais ST para as camadas 0,10 – 0,15, 0,15 – 0,20, 0,20 – 0,30, e 0,30 – 0,40m, possivelmente em decorrência destes locais estarem com umidade elevada.

Os tratamentos de linhas de tráfego nos anos antecessores, apresentaram a menor média de RP para o perfil (0 – 0,40 m), na avaliação realizada aos 28 meses. Assim, os tratamentos Tma1 (1,1 MPa), Tma2 (1,5 MPa), Tme1 e Tme2 (1,3 MPa) apresentaram médias iguais ou inferiores quando comparados aos tratamentos TC ST (1,4 MPa) e TAA ST (1,3MPa) que foram locais sem tráfego nas últimas 3 safras. Os tratamentos e camadas apresentados na Tabela 4, mostram que as antigas linhas de tráfego Tma1 e Tme1 apresentam RP menor que 1,0 MPa, e próximo a esse valor até a camada 0,10 – 0,15m. Estatisticamente há diferença até a camada 0,15 – 0,20m, onde as avaliações para Tma1 registram 1,3 MPa. Drescher et al. (2012), reportam avaliações de RP em tráfego tradicional sob SPD por 8 anos, bem como os tratamentos com escarificação e aração com efeitos de redução de até dois anos para RP.

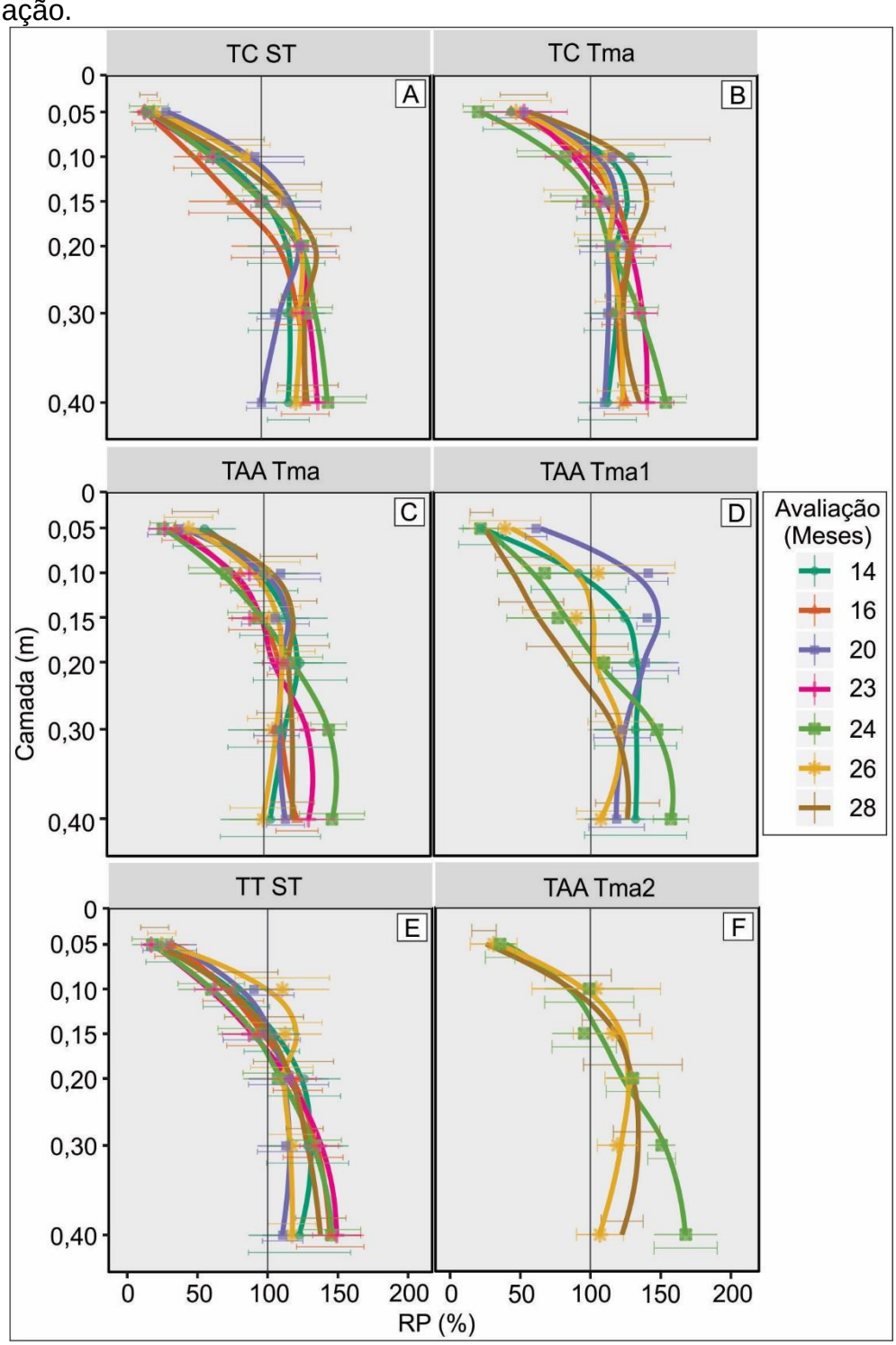
Nas avaliações de RP realizadas em área com TC na linha de tráfego de máquinas, o registro de 2,0 MPa foi de aproximadamente 0,10 m da superfície. Já nos locais sem tráfego, esse mesmo valor foi encontrado próximo a 0,20 m da superfície em trabalho conduzido em Vertissolo sob PD há 15 anos (LUHAIB *et al.*, 2017). Para Lanzanova *et al.* (2007) a camada com a maior RP foi mais superficial de 0,05 – 0,08 m, representando valores de 2,5 a 2,6 MPa pelo efeito do pisoteio animal em um Argissolo.

Uniformemente para última observação, 28 meses, os locais sem tráfego para TC e TAA apresentaram redução da RP nas camadas 0 – 0,05 e 0,05 – 0,10 m quando comparados ao TT. O tratamento TAA ST estatisticamente apresentou redução, podendo ser um indicativo que essas melhoras ocorrem a longo prazo. De acordo com Reichert et al. (2016) os resultados de plantio direto com tráfego controlado são altamente dependentes do tempo, sendo o estágio de estabilização alcançado em 14 anos.

A frequência de RP superior a 2 MPa, independente da intensidade de tráfego, foi superior na avaliação de menor umidade (0,23 % aos 26 meses), foram registradas 38 % de ocorrências. Já para registros de RP maior que 1,5 MPa, considerada moderada por ARSHAD *et al.* (1996), foram 46, 43 e 63 % para as avaliações aos 16, 26 e 28 meses para RP variando de 1,5 a 2,0 MPa. A umidade na coleta, aos 16 e 28 meses, apresentou diferença de 0,01 %. Essa redução pode ser atribuída a umidade, somando-se ao tráfego adotado a 28 meses.

A Figura 3 apresenta a RP relativa para os tratamentos mais contrastantes (TC ST, TC Tma, TAA Tma, TAA Tma1, TAA Tma2 e TT ST) para todas as avaliações realizadas. Os dados foram relativizados às médias apresentadas na Tabela 3. Assim, o efeito da influência da umidade, com as avaliações de RP é desconsiderado. A ação dos sulcadores até a camada 0,15 – 0,20 m é percebida na Figura 3D. A maior parte dos registros das avaliações nesse tratamento são abaixo da média, representado pela linha retilínea em 100 %. A redução da RP foi efêmera, ocorre temporariamente para os tratamentos TAA. O tratamento TAA Tma 2 (Figura 3F), apresenta os registros em que a manutenção da RP não se mantém menor que a média. Seus registros são semelhantes aos TAA Tma (Figura 3C), como mostrado nas figuras.

Figura 3. Avaliação da resistência mecânica a penetração (RP) em diferentes épocas de avaliação para as intensidades de tráfego. Os registros foram relativizados para a média de cada avaliação.



RP expressa em porcentagem (%) calculada a partir da média de cada avaliação.

6.5.2 Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo

A interação foi significativa para DS e macro aos 14 e 28 meses de avaliação e micro e PT aos 28 (Tabela 2). A média dessas propriedades do solo foram comparadas para a interação entre os fatores Tráfego X Camada, e são apresentadas a seguir.

Na Tabela 5, os dados de DS apresentaram diferença na camada de 0 – 0,05 m para as avaliações aos 14 e 28 meses. Esses resultados demonstram a variabilidade espacial ocasionada pelo deslocamento dos implementos, bem como os locais livres que apresentam a menor densidade. Contrariamente, para Guenette & Hernandez-Ramirez (2018) as propriedades físicas do solo nas linhas de tráfego média e máxima não tiveram diferença, sendo considerada a primeira passada aquela que causa a maior influência sobre as propriedades do solo. Não há um consenso de qual o limite crítico para a DS, entretanto é possível estabelecer que a DS superior a 1,50 g cm^{-3} pode ser considerada prejudicial. Trabalhos como de Reichert *at al.*, (2003) consideram como crítica a superior a 1,55 g cm^{-3} para solos de textura média, já para Sato *et al.*, (2015) consideram 1,51 g cm^{-3} como limitante para desenvolvimento do sistema radicular da cultura da soja em solos argilosos.

A maior DS observada nas avaliações foi de 1,56 g cm^{-3} em local de intenso tráfego, sendo considerado um valor baixo pelas condições que os tratamentos intensos ofereciam. São observadas 11 ocorrências de DS superior a 1,50 g cm^{-3} para avaliação aos 14 meses e 5 ocorrências para a avaliação aos 28 meses. Pode-se destacar que a maior parte dessas ocorrências ocorre na profundidade de 0,10 a 0,20 m, em ambas avaliações.

Tabela 5. Densidade do solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas.

		TC			TAA							TT	
		ST	Tma	Tme	ST	Tma	Tma1	Tma2	Tme	Tme1	Tme2	ST	Tma
Avaliação (Meses)	Camada (m)	Densidade do solo (g cm^{-3})											
14	0 - 0,05	1,06 E	1,37 AB	1,11 DE	1,06 E	1,42 A	1,18 BCDE	-	1,31 ABCD	1,24 ABCDE	-	1,14 CDE	1,35 ABC
	0,05 - 0,10	1,38 A	1,55 A	1,47 A	1,41 A	1,49 A	1,41 A	-	1,49 A	1,41 A	-	1,44 A	1,52 A
	0,10 - 0,15	1,51 A	1,55 A	1,53 A	1,44 A	1,50 A	1,46 A	-	1,48 A	1,50 A	-	1,50 A	1,48 A
	0,15 - 0,20	1,51 A	1,52 A	1,49 A	1,40 A	1,47 A	1,48 A	-	1,47 A	1,44 A	-	1,48 A	1,51 A
	0,20 - 0,30	1,47 A	1,46 A	1,40 A	1,36 A	1,46 A	1,44 A	-	1,42 A	1,44 A	-	1,44 A	1,47 A
	0,30 - 0,40	1,42 A	1,37 A	1,33 A	1,35 A	1,39 A	1,41 A	-	1,40 A	1,45 A	-	1,37 A	1,38 A
28	0 - 0,05	1,13 BC	1,44 A	1,29 AB	1,02 C	1,41 A	1,29 AB	1,38 A	1,28 AB	1,14 BC	1,25 AB	1,33 AB	1,35 AB
	0,05 - 0,10	1,44 A	1,56 A	1,44 A	1,40 A	1,48 A	1,35 A	1,45 A	1,42 A	1,38 A	1,40 A	1,39 A	1,53 A
	0,10 - 0,15	1,51 A	1,47 A	1,48 A	1,47 A	1,52 A	1,46 A	1,48 A	1,49 A	1,47 A	1,47 A	1,49 A	1,53 A
	0,15 - 0,20	1,43 A	1,38 A	1,42 A	1,41 A	1,46 A	1,41 A	1,45 A	1,45 A	1,45 A	1,41 A	1,47 A	1,40 A
	0,20 - 0,30	1,30 A	1,34 A	1,35 A	1,40 A	1,41 A	1,37 A	1,35 A	1,40 A	1,33 A	1,40 A	1,40 A	1,38 A
	0,30 - 0,40	1,29 A	1,31 A	1,30 A	1,32 A	1,38 A	1,28 A	1,34 A	1,32 A	1,29 A	1,35 A	1,35 A	1,31 A

Avaliação 14: florescimento da soja (janeiro 2017); avaliação 28: após colheita mecânica da soja (abril 2018). Letras maiúsculas diferentes nas linhas indicam diferente significância para intensidade de tráfego x camada (P < 0,05; Tukey).

Para avaliação aos 14 meses, os tratamentos ST (TC e TAA) apresentam a menor densidade, quando comparados aos locais sem tráfego são 14, 29 e 20 % menos densos que os tratamentos TT ST, TAA Tme1 e TAA Tma1, respectivamente. Para os locais de tráfego TAA Tma apresentou a maior densidade, maior até mesmo TC Tma onde as linhas são mantidas durante as safras.

Para avaliação aos 28 meses, as maiores DS foram encontradas nos tratamentos TC Tma, TAA Tma, TAA Tma2, locais de tráfego atual e onde ocorreram tráfego há dois anos. Já o tratamento TAA ST apresentou a menor densidade entre os tratamentos. Em trabalho com tráfego controlado, a DS para a camada 0,05 – 0,10m foi de 1,18 a 1,26 g cm^{-3} para locais ST, já Tme variou de 1,32 a 1,41 g cm^{-3}, e Tma 1,38 a 1,44 g cm^{-3} (GUENETTE & HERNANDE, 2018). Para McHugh et al. (2009), a DS nos locais sem tráfego se reduz de 1,39 para 1,25 g cm^{-3} após 22 meses de adoção do TC. Pode-se destacar que a maior densidade avaliada aos 14 e 28 meses estão no tratamento TC Tma, camadas 0,05 – 0,10 e 0,10 – 0,15 m na avaliação aos 14 meses (1,55 g cm^{-3}) e camada 0,05–0,10 m na avaliação aos 28 (1,56 g cm^{-3}).

Já para macroporosidade, os resultados mínimos são encontrados nos tratamentos TC Tma e TT Tma na camada 0,05 – 0,10m (< 4,00 cm^3 cm^{-3}), para avaliações aos 14 e 28 meses. Resultados que apontam que a camada compactada pelo tráfego dos implementos está localizada entre as camadas 0,05 – 0,10 e 0,10 – 0,15m, ou seja, entre profundidade de 0,05 a 0,15m do perfil do solo.

Tabela 6. Macroporosidade do solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas.

		TC			TAA							TT	
Avaliação (Meses)	Camada (m)	ST	Tma	Tme	ST	Tma	Tma1	Tma2	Tme	Tme1	Tme2	ST	Tma
		Macroporosidade (cm^3 cm^{-3})											
14	0 - 0,05	21,91 A	6,86 C	18,78 AB	18,47 AB	5,52 C	18,91 AB	-	6,08 C	14,18 B	-	15,59 AB	5,44 C
	0,05 - 0,10	10,50 A	3,88 A	6,63 A	10,29 A	5,26 A	5,74 A	-	4,24 A	9,39 A	-	7,45 A	3,80 A
	0,10 - 0,15	9,00 A	4,92 A	5,52 A	8,01 A	6,37 A	8,01 A	-	4,30 A	7,58 A	-	6,57 A	5,86 A
	0,15 - 0,20	6,56 A	4,31 A	5,07 A	8,44 A	7,43 A	6,38 A	-	5,12 A	6,89 A	-	6,33 A	4,68 A
	0,20 - 0,30	6,86 A	5,35 A	4,84 A	6,86 A	5,41 A	6,77 A	-	6,42 A	7,27 A	-	5,22 A	5,85 A
	0,30 - 0,40	7,24 A	5,67 A	5,87 A	7,56 A	6,38 A	6,51 A	-	7,25 A	7,25 A	-	6,13 A	5,97 A
28	0 - 0,05	21,5 AB	3,43 D	9,12 CD	24,48 A	5,26 D	14,64 BC	7,82 CD	9,3 CD	17,33 B	14,66 BC	8,89 CD	6,69 D
	0,05 - 0,10	7,66 AB	3,16 B	5,68 AB	8,44 AB	4,94 AB	11,57 A	7,68 AB	4,79 AB	7,66 AB	9,15 AB	7,92 AB	3,07 B
	0,10 - 0,15	5,86 A	4,21 A	5,03 A	4,59 A	3,81 A	6,32 A	4,48 A	4,73 A	5,91 A	4,83 A	5,20 A	4,45 A
	0,15 - 0,20	4,62 A	4,83 A	4,14 A	5,76 A	5,77 A	7,48 A	4,95 A	5,08 A	5,56 A	4,98 A	5,28 A	4,98 A
	0,20 - 0,30	6,69 A	4,81 A	5,04 A	5,13 A	5,71 A	7,21 A	7,36 A	5,71 A	6,30 A	5,37 A	5,17 A	5,64 A
	0,30 - 0,40	6,81 A	4,52 A	6,30 A	5,72 A	4,93 A	7,75 A	5,22 A	6,26 A	5,87 A	5,08 A	5,25 A	7,34 A

Avaliação 14: florescimento da soja (janeiro 2017); avaliação 28: após colheita mecânica da soja (abril 2018). Letras maiúsculas diferentes nas linhas indicam diferente significância para intensidade de tráfego x camada ($P < 0,05$; Tukey).

A macroporosidade apresentou diferenças significativas nos tratamentos ST, sendo percebida melhora na estrutura do solo quando avaliado aos 14 meses para a camada 0 – 0,05 m. Quando são observados os resultados da avaliação aos 28 meses, ocorrem alterações até a camada 0,05 – 0,10 m. Nesta camada o tratamento que apresenta maior macroporosidade foi TAA Tma1, o qual foi linha de tráfego na safra anterior, mostrando que as melhoras para esse tratamento se mantiveram durante o ciclo da cultura da aveia e da soja. Resultados mostram que o tráfego controlado contribuiu para o aumento da macroporosidade do solo a 0,10 m em 50 %, e aumento de 27 % na profundidade de 0,30 m em um Vertisolo sob plantio convencional (MCHUGH *et al.,* 2009).

Houve diferença da microporosidade para a camada 0 – 0,05 m na avaliação aos 28 meses, os tratamentos com tráfego apresentaram as maiores observações (Tabela 7). A variação do tratamento TC Tme 41,21 cm^3 cm^{-3}, para o menor registro do tratamento TC ST 34,58 cm^3 cm^{-3}, essa diferença representa 19 % depois da adoção do TC.

Tabela 7. Microporosidade solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas.

Avaliação (Meses)	Camada (m)	TC			TAA							TT	
		ST	Tma	Tme	ST	Tma	Tma1	Tma2	Tme	Tme1	Tme2	ST	Tma
		Microporosidade (cm^3 cm^{-3})											
14	0 - 0,05	35,54 ns	37,70	37,13	39,37	42,18	35,82	-	44,53	36,16	-	38,19	43,45
	0,05 - 0,10	36,40	38,87	37,22	38,60	40,07	36,46	-	40,32	39,25	-	37,54	39,12
	0,10 - 0,15	33,85	36,31	35,63	37,82	36,90	37,36	-	39,25	37,29	-	37,09	37,76
	0,15 - 0,20	37,09	36,81	36,17	36,80	35,50	38,20	-	39,98	37,13	-	36,95	37,23
	0,20 - 0,30	37,97	37,44	40,90	41,13	37,26	38,08	-	39,12	37,05	-	39,27	39,92
	0,30 - 0,40	38,53	38,92	41,30	40,38	39,26	40,28	-	40,83	37,63	-	39,56	41,85
28	0 - 0,05	34,58 C	39,63 ABC	41,21 A	35,52 BC	39,72 AB	35,19 BC	37,93 ABC	39,57 ABC	36,62 ABC	36,87 ABC	38,55 ABC	39,72 AB
	0,05 - 0,10	36,32 A	37,74 A	39,38 A	37,72 A	37,19 A	35,26 A	36,71 A	39,66 A	39,14 A	37,28 A	36,48 A	36,54 A
	0,10 - 0,15	35,79 A	38,73 A	38,05 A	37,22 A	35,96 A	35,68 A	36,96 A	36,56 A	36,44 A	37,41 A	35,74 A	36,5 A
	0,15 - 0,20	39,07 A	39,37 A	38,87 A	38,32 A	37,37 A	36,41 A	37,01 A	37,02 A	37,91 A	37,55 A	37,32 A	38,94 A
	0,20 - 0,30	40,44 A	42,20 A	40,96 A	39,93 A	37,99 A	38,2 A	39,81 A	39,04 A	40,87 A	38,97 A	39,32 A	40,85 A
	0,30 - 0,40	41,67 A	43,19 A	41,45 A	40,97 A	40,59 A	38,94 A	41,88 A	41,00 A	41,27 A	41,16 A	41,14 A	40,66 A

Avaliação 14: florescimento da soja (janeiro 2017); avaliação 28: após colheita mecânica da soja (abril 2018). Letras maiúsculas diferentes nas linhas indicam diferente significância para intensidade de tráfego x camada ($P < 0,05$; Tukey).

Para Moraes et al. (2018) foi encontrado resultado semelhante após 6 passadas de trator, houve aumento de 5 % na camada 0 – 0,05 m, e 4 % para camada 0,05 – 0,10 m para microporosidade do solo em um Argissolo de textura média. O aumento da microporosidade pode afetar a retenção de água no solo, o trabalho de McHugh et al. (2009) relata que nos locais livres de tráfego a capacidade de água disponível aumentou de 7 para 13 mm na camada de 0 – 0,10m. Para mesma camada do solo, Luhaib *et al.* (2017) apresentam resultados de conteúdo de água 10 % superior nas linhas de tráfego, quando comparado aos locais sem tráfego em um Vertisolo.

A Tabela 8 apresenta os dados de PT, com diferenças estatísticas nas avaliações 14 e 28 meses. A avaliação aos 14 meses, na camada 0 – 0,05 m, apresenta diferença entre os tratamentos: destacando-se com PT mais alta os tratamentos TC ST e TAA ST, tal qual o tratamento TC Tma a menor PT. Para os dados da avaliação aos 28 meses, ocorre redução da PT nos locais de tráfego em relação a avaliação aos 14 meses. Podendo-se atribuir esse fato as épocas distintas das avaliações. Nesses locais, a variação compreende reduções de 3 a 11%, logo nos locais sem tráfego a variação foi de -13 % até o incremento de 7 %, quando observado a camada 0 – 0,05 m.

Tabela 8. Porosidade total solo em função das intensidades de tráfego e profundidades avaliadas.

		TC			TAA							TT	
		ST	Tma	Tme	ST	Tma	Tma1	Tma2	Tme	Tme1	Tme2	ST	Tma
Avaliação (Meses)	Camada (m)	Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})											
14	0 - 0,05	57,45 A	44,56 C	55,91 AB	57,83 A	47,69 BC	54,73 AB	-	50,62 ABC	50,34 ABC	-	53,78 AB	48,90 BC
	0,05 - 0,10	46,90 A	42,75 A	43,85 A	48,89 A	45,33 A	42,20 A	-	44,56 A	48,64 A	-	44,99 A	42,92 A
	0,10 - 0,15	42,85 A	41,23 A	41,15 A	45,84 A	43,26 A	45,37 A	-	43,55 A	44,87 A	-	43,66 A	43,62 A
	0,15 - 0,20	43,65 A	41,12 A	41,24 A	45,25 A	42,94 A	44,58 A	-	45,10 A	44,02 A	-	43,29 A	41,91 A
	0,20 - 0,30	44,82 A	42,79 A	45,74 A	47,99 A	42,67 A	44,85 A	-	45,54 A	44,32 A	-	44,49 A	45,77 A
	0,30 - 0,40	45,77 A	44,59 A	47,17 A	47,94 A	45,64 A	46,79 A	-	48,08 A	44,88 A	-	45,70 A	47,82 A
28	0 - 0,05	56,07 AB	43,06 E	50,33 BCD	60,00 A	44,98 DE	49,83 BCDE	45,75 DE	48,87 BCDE	53,95 ABC	51,53 BCD	47,44 CDE	46,41 DE
	0,05 - 0,10	43,99 A	40,90 A	45,07 A	46,16 A	42,13 A	46,82 A	44,39 A	44,44 A	46,80 A	46,42 A	44,40 A	39,61 A
	0,10 - 0,15	41,65 A	42,94 A	43,09 A	41,80 A	39,77 A	42,00 A	41,44 A	41,29 A	42,34 A	42,24 A	40,94 A	40,95 A
	0,15 - 0,20	43,68 A	44,20 A	43,01 A	44,08 A	43,14 A	43,89 A	41,96 A	42,10 A	43,47 A	42,54 A	42,60 A	43,91 A
	0,20 - 0,30	47,13 A	47,01 A	46,01 A	45,06 A	43,69 A	45,41 A	47,17 A	44,75 A	47,17 A	44,34 A	44,48 A	46,49 A
	0,30 - 0,40	48,48 A	47,71 A	47,75 A	46,69 A	45,52 A	46,69 A	47,10 A	47,27 A	47,14 A	46,24 A	46,38 A	48,00 A

Avaliação 14: florescimento da soja (janeiro 2017); avaliação 28: após colheita mecânica da soja (abril 2018). Letras maiúsculas diferentes nas linhas indicam diferente significância para intensidade de tráfego x camada (*P* < 0,05; Tukey).

6.5.3 Infiltração de água no solo

Os resultados da avaliação de infiltração de água no solo propiciaram a geração de equações para cada tratamento avaliado. Assim as equações de velocidade de infiltração instantânea (VI) e infiltração acumulada (I) propostas por Kostiakov.

Equações potenciais de Kostiakov (BERNARDO *et al.*, 2006):

Equação 1. Velocidade infiltração instantânea (mm h^{-1})*:

$$VI = 600 \,.\, K \,.\, a . T^{a-1}$$

Equação 2. Infiltração acumulada (mm)*:

$$I = 10 \,.\; K . T^{a}$$

Onde:

VI = Infiltração instantânea

I = Infiltração acumulada

a e K = constante, dependente do solo.

T = Tempo

*as equações foram adaptadas para nas unidades de resposta: de cm para mm, e cm min^{-1} para mm h^{-1}.

Equações de número 3 a 15 foram obtidas a partir das médias das avaliações dos tratamentos para infiltração instantânea (mm h^{-1}):

Equação 3. Inicial (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}36 \,.\, 0{,}69 \,.\, T^{0{,}69-1}$$

Equação 4. TC ST (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}87 \,.\, 0{,}57 \,.\, T^{0{,}57-1}$$

Equação 5. TC Tme (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}26 \,.\, 0{,}26 \,.\, T^{0{,}26-1}$$

Equação 6. TC Tma (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}22 \,.\, 0{,}22 \,.\, T^{0{,}22-1}$$

Equação 7. TAA ST (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}80 \,.\, 0{,}62 \,.\, T^{0{,}62-1}$$

Equação 8. TAA Tme (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}40 \,.\, 0{,}51 \,.\, T^{0{,}51-1}$$

Equação 9. TAA Tme1 (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}92 \,.\, 0{,}34 \,.\, T^{0{,}34-1}$$

Equação 10. TAA Tme2 (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}62 \,.\, 0{,}30 \,.\, T^{0{,}30-1}$$

Equação 11. TAA Tma (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}22 \,.\, 0{,}30 \,.\, T^{0{,}30-1}$$

Equação 12 TAA Tma1 (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}56 \,.\, 0{,}36 \,.\, T^{0{,}36-1}$$

Equação 13TAA Tma2 (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}47 \,.\, 0{,}29 \,.\, T^{0{,}29-1}$$

Equação 14. TT ST (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}80 \,.\, 0{,}34 \,.\, T^{0{,}34-1}$$

Equação 15. TT ST (VI).

$$VI = 600 \,.\, 0{,}32 \,.\, 0{,}25 \,.\, T^{0{,}25-1}$$

Equações de número 16 a 28 foram obtidas a partir das médias das avaliações dos tratamentos para infiltração acumulada (mm):

Equação 16 Inicial (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}36 \,.\, T^{0{,}69}$$

Equação 17 TC ST (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}87 \,.\, T^{0{,}57}$$

Equação 18 TC Tme (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}26 \,.\, T^{0{,}26}$$

Equação 19 TC Tma (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}22 \,.\, T^{0{,}22}$$

Equação 20 TAA ST (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}80 \,.\, T^{0{,}62}$$

Equação 21 TAA Tme (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}40 \,.\, T^{0{,}51}$$

Equação 22 TAA Tme1 (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}92 \,.\, T^{0{,}34}$$

Equação 23 TAA Tme2 (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}62 \,.\, T^{0{,}30}$$

Equação 24 TAA Tma (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}22 \,.\, T^{0{,}30}$$

Equação 25 TAA Tma1 (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}56 \,.\, T^{0{,}36}$$

Equação 26 TAA Tma2 (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}47 \,.\, T^{0{,}29}$$

Equação 27 TT ST (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}80 \,.\, T^{0{,}34}$$

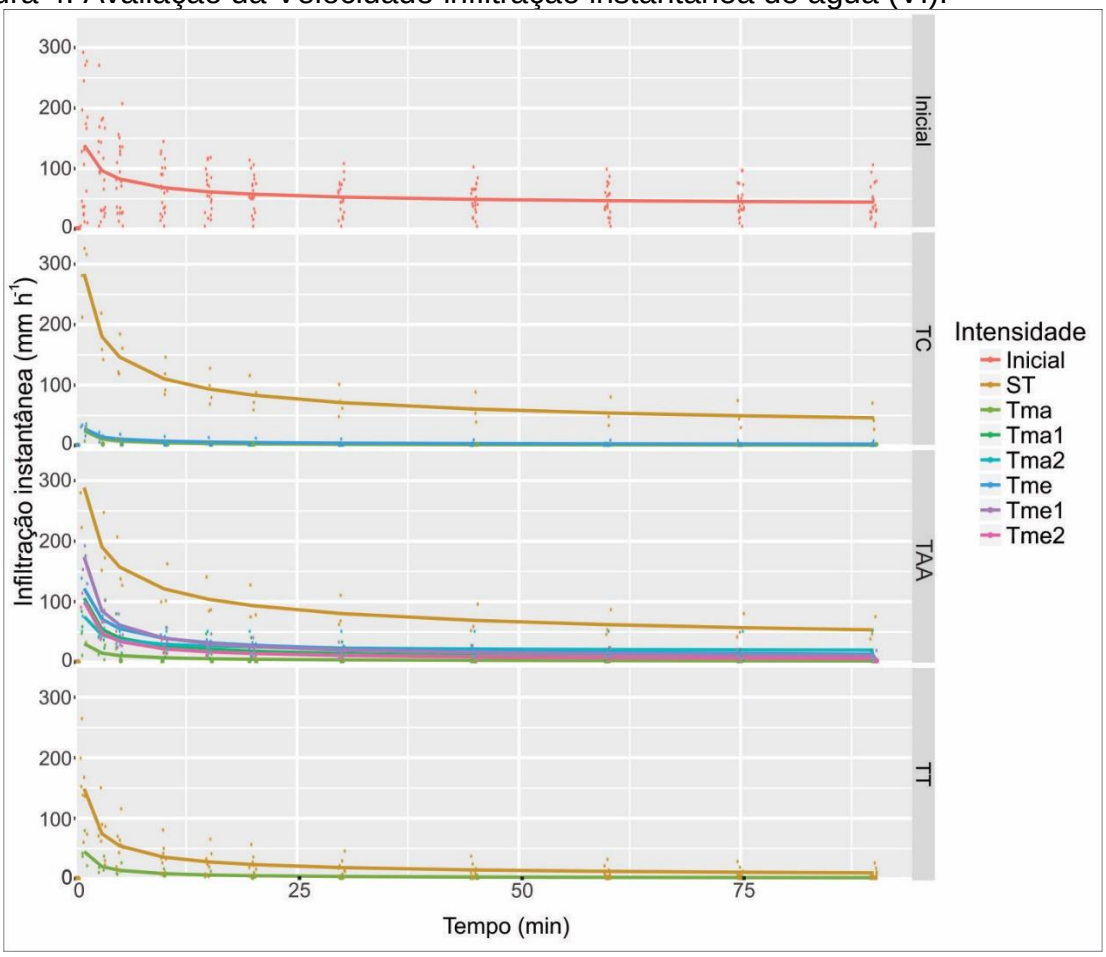
Equação 28 TT Tma (I).

$$I = 10 \,.\, 0{,}32 \,.\, T^{0{,}25}$$

Dentre as propriedades analisadas parece ser a mais sensível em detectar e destacar as diferenças nas intensidades de tráfego. A avaliação inicial apresentou VI média de 138 mm h^{-1} nos primeiros minutos, e I no período de 83 mm. Já o tráfego controlado após três anos de adoção para o tratamento ST apresentou VI de 286 mm h^{-1} nos primeiros minutos e I no período de 122 mm.

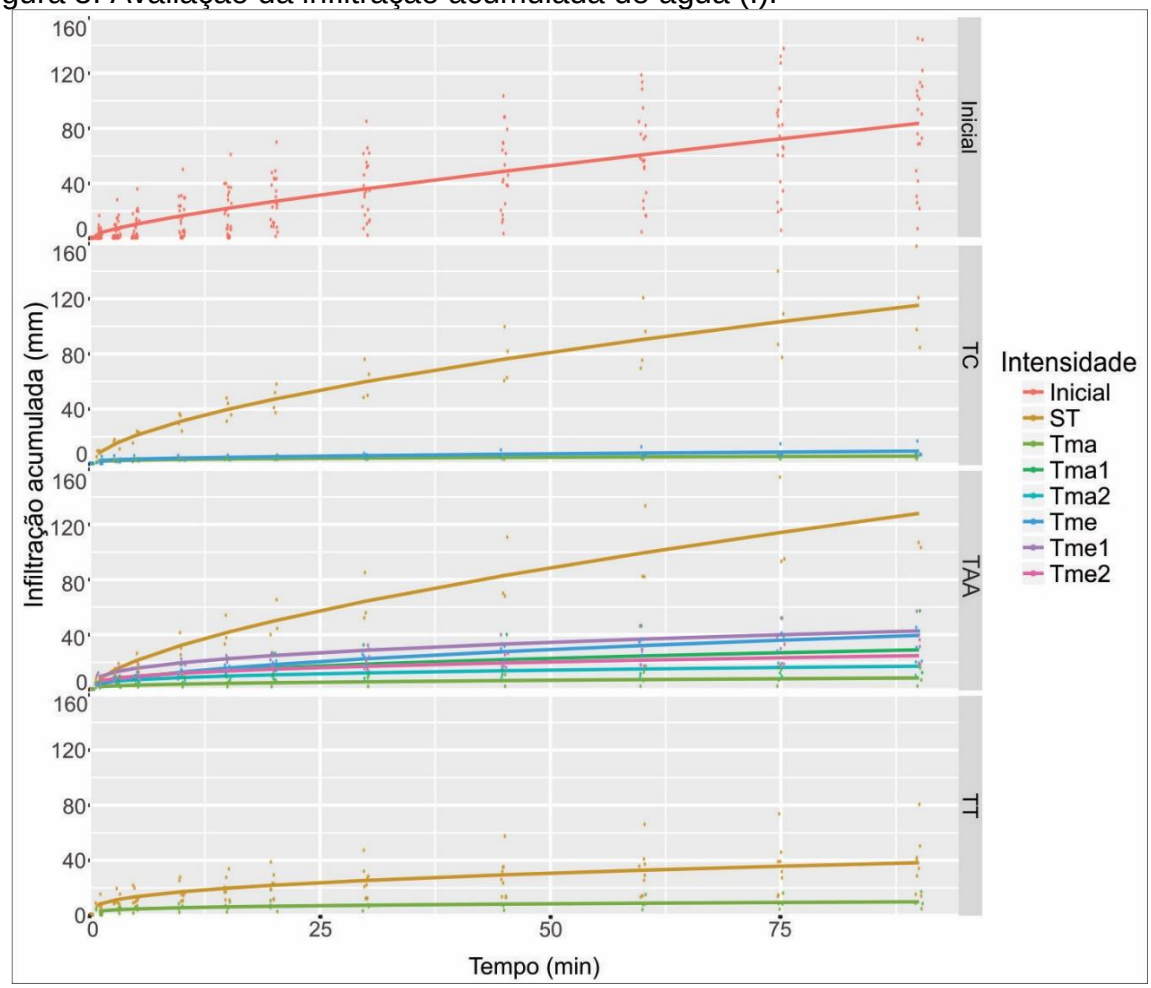
Para avaliação realizada após a colheita da soja da safra 2017/18, os locais com tratamento ST apresentaram infiltração superior, distinguindo os tratamentos TC e TAA que apresentaram VI e I semelhantes. Quando comparados ao tratamento TT ST apresentam 92 e 217 % superiores para taxa e acumulado de infiltração médias. Tratamentos que foram linhas antigas de tráfego Tma1, Tma2, Tme1 e Tme2 apresentaram I inferior quando comparado aos tratamentos ST (TC e TAA) em cerca de 4,2, 7,1, 1,2 e 2,1 vezes menor, respectivamente (Figura 5).

Figura 4. Avaliação da Velocidade infiltração instantânea de água (VI).



As médias acumuladas com maior volume pertencem aos locais livres de tráfego (TC e TAA) quando comparadas aos tratamentos Tma a variação acumulada foi 19,6 e 21,7 vezes superior, para os respectivos tratamentos TC ST e TAA ST. Resultados semelhantes encontrados por Girardello et al. (2016) relataram que a variação de infiltração acumulada pode variar de 5 a 22 vezes, quando são comparados locais sem tráfego com intenso tráfego. Já Alba et al. (2011) apresentam resultados de infiltração acumulada em locais livres de tráfego próximo de 100 mm, e em locais com tráfego (trator e pulverizador) não superando 20 mm. Outros trabalhos também trazem como um dos resultados da adoção do TC o aumento da infiltração de água (ANTILLE *et al.*, 2015; CHAMEN, 2015; CHAMEN, 2011; GIRARDELLO *et al.*, 2016; ISBISTER *et al.*, 2013; TULLBERG *et al.*, 2007)

Figura 5. Avaliação da infiltração acumulada de água (I).



Em alguns trabalhos a redução da infiltração de água está relacionada com o aumento da densidade e redução da macroporosidade (ALBA et al., 2011; GASSEN, 2011; LANZANOVA et al., 2007; NICOLOSO et al., 2008). Tullberg et al. (2007) avaliando a precipitação natural em solos da Austrália e da China, avaliando dados acumulados durante 5 anos, verificou que a infiltração da água da chuva é reduzida de 5 a 10 % para solos trafegados sob PD.

Neste trabalho, avaliações do escoamento superficial da água da chuva não foram abordados. Apesar disso, sabendo-se que a capacidade de infiltração está diretamente relacionada as perdas de solo por erosão em sulcos, os locais de menor infiltração, como Tma, tendem a contribuir com escoamento em precipitações de alta intensidade. O escoamento e erosão tendem a ser mais severos em locais compactados, com pouca palha ou com palha removida (pastagem/silagem) em cultivo mínimo ou PD (TULLBERG, 2010). No entanto, pode-se inferir que a capacidade de infiltração dos locais sem tráfego do TC e TAA terão capacidade de

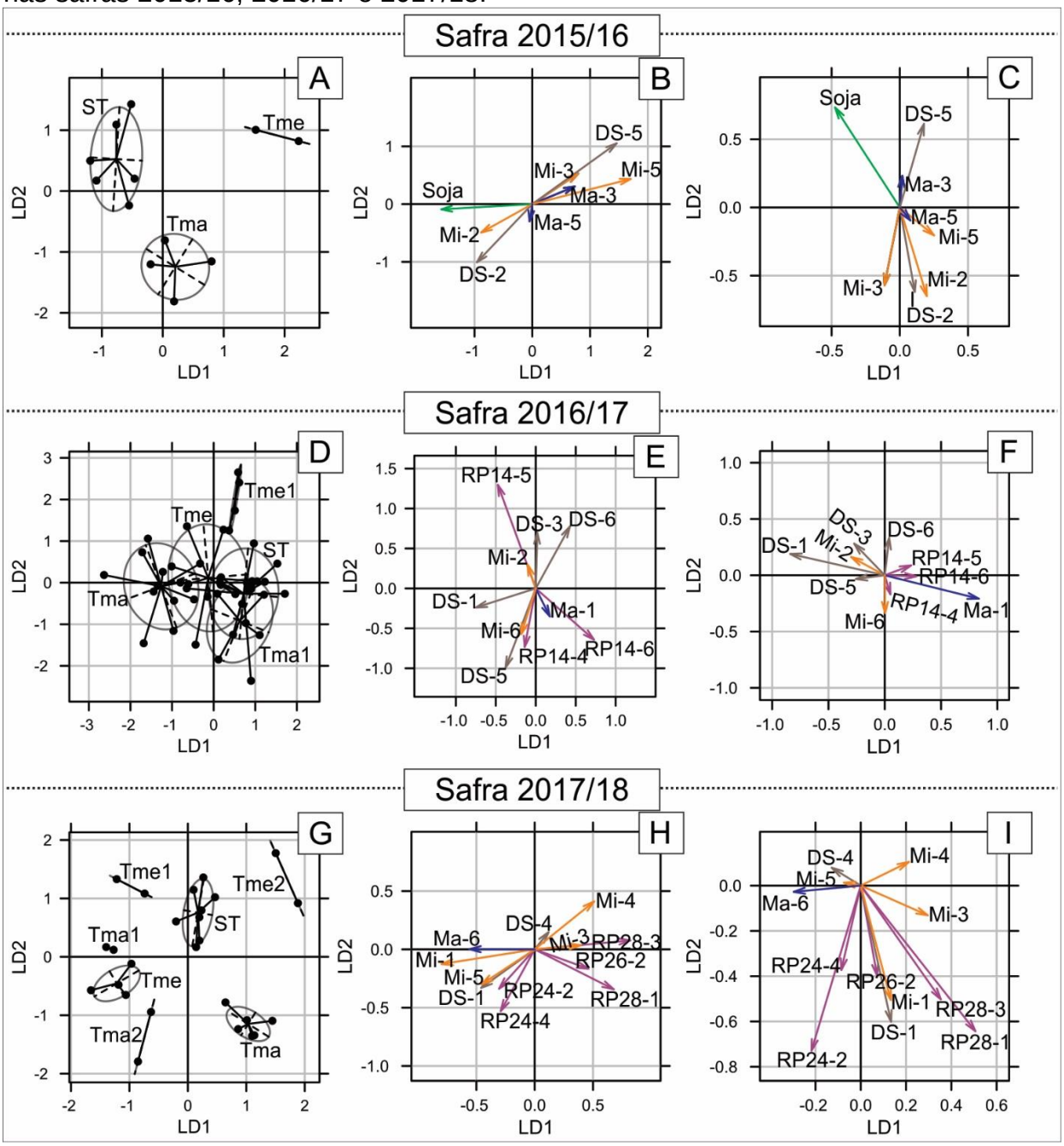
infiltração superior em 100 mm acumulados, quando comparados ao tráfego tradicional em 90min (avaliação).

6.5.4 Análise discriminante de Componentes Principais (ADCP)

Apenas componentes com valores maiores que 1 foram considerados na análise, de modo que apenas as primeira e segunda discriminantes lineares (LD) foram consideradas para as safras de soja 2015/16, 2016/17 e 2017/18.

Com base nas variáveis analisadas para safra 2015/16 (macroporosidade - macro, microporosidade – micro, e densidade do solo - DS para as 6 camadas avaliadas) houve uma completa separação dos tratamentos (Figura 6A). A variável mais importante, separando as intensidades de tráfego (ST, Tme e Tma), foi produtividade de soja, apresentado maior contribuição na discriminante linear 1 - LD1 (Figura 6B), de modo que houve uma tendência da produtividade ser maior nos tratamentos ST (Figura 6C). Houve uma tendência de Tma apresentar os maiores valores de microporosidade, estando estes inversamente correlacionados com a densidade do solo.

Figura 6. Análise discriminante de componentes principais para produtividade da soja nas safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18.



Tratamentos: Sem tráfego (ST), tráfego médio (Tme), tráfego médio há um ano (Tme1), tráfego médio há dois anos (Tme2), tráfego máximo (Tma), tráfego máximo há um ano (Tma1), tráfego máximo há dois anos (Tma2). Variáveis: Densidade do solo (DS), microporosidade (Mi), macroporosidade (Ma), resistência mecânica a penetração o solo (RP). As variáveis seguidas de hífen mais números correspondem as profundidades das camadas, camadas equivalentes: 1 (0 – 0,05 m), 2 (0,05 – 0,10 m), 3 (0,10 – 0,15 m), 4 (0,15 – 0,20 m), 5 (0,20 – 0,30 m), 6 (0,30 – 0,40 m). Quanto a variável RP é seguida de um número que correspondente aos meses da avaliação seguida da camada (EX: RP24-4 – corresponde a RP avaliação aos 24 meses, camada 4).

Para safra 2016/17 a separação dos tratamentos apresentados na Figura 6D não foi bem clara como na safra anterior, no entanto para os tratamentos Tme1 e Tma1 ficam mais distanciados devido ao efeito proporcionado pela ação dos

sulcadores. As variáveis que estão em maiores profundidades como RP14-5 (RP avaliada no florescimento para camada 0,20 – 0,30 m), DS5 e RP14-6 se destacam na Figura 6E em virtude apresentarem baixa variabilidade entre os diferentes tratamentos. A medida que a Figura 6F destaca com vetores opostos DS -1 (0 – 0,05 m) e Ma-1 (Macroporosidade 0 – 0,05 m), com isso para essa camada há tendência de alta correlação negativa entre as variáveis.

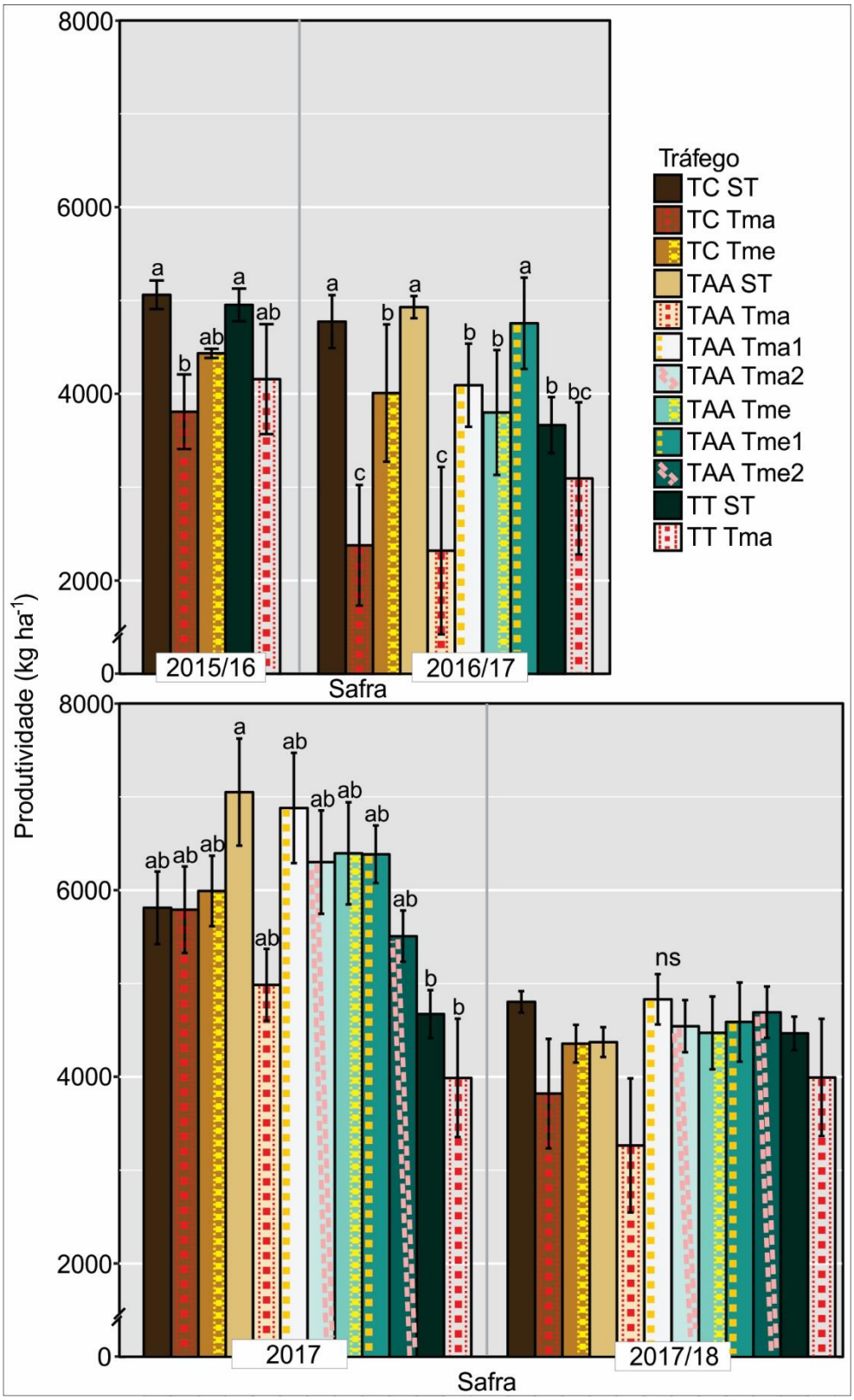
Para safra 2017/18, as variáveis analisadas separaram completamente os tratamentos (Figura 6G), mostrando que as diferenças observadas entre os tratamentos ST, Tma e Tme são maios perceptíveis. Os tratamentos mais afetados pelas intensidades, principalmente ao Tma apresentaram maiores vetores para as variáveis DS-1, RP26-2, RP28-1, RP28-3 e micro 1 (Figura 6I). Enquanto o vetor da variável RP24-2 se correlaciona com o tratamento Tma2, melhor explicando a camada 0,05 – 0,10 m durante o florescimento da soja.

O número de ocorrências correlacionadas com as profundidades foi semelhante, média de cinco vetores para cada camada em média. Para safra 2015/16 a camada que se destacou foi de 0,20 – 0,30 m com 3 vetores, já na safra 2016/17 a camada 0,30 – 0,40 m apresentou 3 ocorrências, enquanto na safra 2017/18 as camadas 0 – 0,05 e 0,15 – 0,20 m apresentam 3 vetores cada.

6.5.5 Produtividade das culturas

Os dados de intensidade de tráfego avaliados da safra 2015/16 apresentaram diferença entre si. A produtividade para ST (TC e TT) foi estatisticamente igual, já o tratamento que sofreu influência dos pneus no plantio (Tme) foi 12 % menos produtivo que o tratamento TC ST que produziu 5061 kg ha^{-1}. A produtividade nos locais de tráfego máximo é impactada por dois fatores: 1º - o tráfego do trator na semeadura; 2º - eliminação de duas linhas pelo amassamento das rodas no deslocamento das pulverizações, essa redução na produtividade é apresentada na Figura 7. A produtividade tráfego controlado (TC ST) foi superior em 22 % comparado média dos tratamentos Tma e Tme. A produtividade de TC Tma foi 25 % menor, já TT Tma foi 18 % menor quando comparados ao tratamento TC ST.

Figura 7. Avaliação da produtividade da cultura da soja e a produção de matéria seca da aveia. Safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18 cultura da soja, ano de 2017 cultura de cobertura da Aveia.



Tratamentos: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). Intensidades de tráfego: sem tráfego (ST), tráfego máximo (Tma), tráfego máximo há um ano (Tma1), tráfego máximo há dois anos (Tma2), tráfego médio (Tme), tráfego médio há um ano (Tme1) e tráfego médio há dois anos (Tma2).

Os registros pluviométricos apresentaram elevada variação para as três safras de soja entre os anos analisados. A primeira safra avaliada, 2015/16, apresentou as maiores precipitações no ciclo da soja (11,2 mm dia^{-1}), bem acima da necessidade que a cultura exige no florescimento (7 a 8 mm dia^{-1}), período do ciclo de maior demanda (FARIAS *et al.*, 2007). A precipitação para ciclo 2016/17 foi de 4,6 mm dia^{-1} (inferior a safra anterior) e a média no período do florescimento foi de 3,8 mm dia^{-1}. Já para safra 2017/18 a precipitação média foi de 4,9 mm dia^{-1}, não reduzindo para o período do florescimento que manteve a média de 7,6 mm dia^{-1}.

Na safra 2016/17, as produtividades obtidas nos locais livre de tráfego representaram 15,2 % superior à média (3858 kg ha^{-1}), logo quando o tratamento TT ST não foi considerado para a média, o aumento representa 20,2 %. Ao verificarmos dentre esses tratamentos o TT apresentou produtividade cerca de 5 % abaixo da média, enquanto os demais tratamentos foram superiores a média em: TAA Tma1 (6,1 %), TAA Tme1 (23,3 %), TC ST (23,7 %) e TAA ST (27,7 %). Os tratamentos com tráfego do pulverizador (Tma) tiveram as produtividades prejudicadas pelo amassamento da cultura, compactação e baixa disponibilidade hídrica. A produtividade de TC Tma foi 52% menor que a do tratamento TAA ST (4928 kg ha^{-1}), que apresenta a maior produtividade da safra 2016/17. Esse resultado se dá principalmente pela baixa pluviosidade ocorrida durante a safra 2016/17. Esse mesmo tratamento na safra anterior, com maior média de pluviosidade, apresentou redução média de 25 % produtividade.

Os tratamentos Tma1 e Tme1 apresentaram respostas diferentes. Enquanto a produtividade de Tma1 foi de 4092 kg ha^{-1}, de Tme1 foi de 4755 kg ha^{-1}. Em virtude da ação do sulcador e das alterações físicas a que o solo foi submetido, não houve melhora nas propriedades físicas em locais de tráfego máximo. Por sua vez, as avaliações em TT também são prejudicadas pela compactação dos implementos, onde o tratamento TT ST tem a produtividade reduzida em 23 % e TT Tma em 35 % quando suas produtividades são comparadas ao TC ST.

A produtividade de massa seca da aveia apresentou média de 5811 kg ha^{-1} entre todos os tratamentos. O tratamento mais produtivo foi TAA ST 21,3 % superior à média, bem como TT Tma teve redução da produção de massa em 19,6 %. Observando-se os locais sem tráfego e qual a porcentagem que apresentam sobre a média dos tratamentos, são superiores à média em maior intensidade TAA ST (21,3 %), TAA Tma1 (18,4 %), TAA Tme (10 %), os tratamentos com as menores

produtividades abaixo da média foram TAA Tma 2 (14,2 %) e TT ST (19,6 %) e TT Tma (31,4 %). Observa-se com isso os efeitos para o tratamento TAA não são semelhantes ao verificados nas propriedades do solo, pois o comportamento dos tratamentos nas antigas linhas de tráfego foi distinto.

Para Moraes *et al*. (2018) observam que não houve prejuízo no sistema radicular em locais com até seis passadas de trator, quando comparado a locais sem tráfego. Eles também observam que, nessas condições, houve um incremento na produtividade do milho. Já os resultados da produtividade de soja observados da safra 2017/18 não apresentaram diferença entre os tratamentos.

6.6 CONCLUSÕES

Os tratamentos com tráfego controlado e alternado anual sem tráfego apresentaram redução da densidade e aumento da macroporosidade do solo para camada 0 – 0,05m. Os tratamentos do tráfego alternado anual para as intensidades média e máxima após um ano apresentam redução da densidade, aumento da macro e porosidade total nas camadas superficiais do solo. Após dois anos não se verifica a manutenção dessas respostas.

Para os locais livre de tráfego, a infiltração de água acumulada foi 21,7 vezes para tráfego alternado anual e 19,6 vezes para tráfego controlado maior, quando comparados aos locais de tráfego máximo. Foi verificado aumento na produtividade da soja nos tratamentos de tráfego controlado e tráfego alternado anual para os locais sem tráfego nas safras 2015/16 e 2016/17. Resposta semelhante foi verificada na produção de matéria seca da aveia avaliada na safra de 2017.

A adoção do tráfego controlado proporciona melhoras, a curto prazo, na estrutura física e taxa de infiltração de água, bem como no incremento produtivo.

6.7 REFERÊNCIAS

ALBA, P. J. et al. Tráfego controlado em culturas de grãos no RS: princípios, desafios e resultados preliminares. **Revista Plantio Direto** v.122, n. março-abril, p.1–12, 2011.

ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift.** v. 22, n. 6, p.711–728, 2013.

AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **R. Bras. Ci. Solo.** v.25, n. 1, p. 189–197, 2001.

ANTILLE, D. L. et al. Potential to increase productivity and sustainability in Argentine an agriculture with controlled traffic farming: a short discussion. Acta Technologica Agriculturae v.18, n.3, p.83–87, 2015.

ANTILLE, D. L. et al. Soil compaction and controlled traffic considerations in Australian cotton-farming systems. **Crop and Pasture Science** v. 67, n. 1, p. 1–28, 2016.

ARSHAD, M A; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., ed. **Methods for assessing soil quality.** Madison: Soil Science Society of America, p.123-141. 1996.

ASAE, Engineers american society of agricultural. Soil cone penetrometer. SAE **Agricultural Engineers Yearbook** n.313:1, p.368–369, 1976.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ª Edição, Viçosa, MG: Editora UFV, p.625, 2006.

BERTOLLO, G. M. et al. Desempenho de trator em semeadura com diferentes configurações de sulcadores em área com tráfego controlado de máquinas. **Revista de Engenharia Agrícola** v.38, n. 5, 2018.

BEUTLER, A. N. et al. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.43, n. 11, p.1591–1600, 2008.

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

CHAMEN, W. C. T. Controlled traffic farming - From worldwide research to adoption in Europe and its future prospects. **Acta Technologica Agriculturae**. v.18, n.3, p.64–73, 2015.

CHAMEN, W. C. T. et al. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research** v.146, p.10–25, 2015.

CHAMEN, W. C. T. The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types. PhD Thesis, Cranfield University p.305, 2011.

CONAB, Companhia nacional de abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, safra 2017/18 - Décimo primeiro levantamento. v.5, n.11, p.148, 2018.

COTRIJAL. Cotrijal, histórico de chuvas. Disponível em: <http://cotrijal.com.br/chuva>. Acesso em: 25 maio. 2018.

CUBILLA, M. et al. Plantas de cobertura do solo: uma alternativa para aliviar a compactação em Sistema Plantio Direto. **Revista Plantio Direto** v.71, n.1, p.29–32, 2002.

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** v.36, n.6, p.1836–1844, 2012.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3ª.ed. Rio de Janeiro, RJ. P. 573, 2017.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, p.271. 1979.

EMBRAPA, Clima Temperado. Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. p.334, 2012.

EMBRAPA, Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ. p.230. 2011

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; BAILEY, B. A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** v.36, n.19–20, p.2733–2757, 2005.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Circular Técnica 48 - Embrapa Soja. Londrina, PR. 2007.

GASSEN, D. Tráfego controlado como alternativa para reduzir a compactação do solo. **Revista Plantio Direto** v.111, p.4–10, 2011.

GIRARDELLO, V. C. et al. Benefícios do tráfego controlado de máquinas no Rio Grande do Sul. In: SANTI, A.L. et al. (Orgs.). Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul. 1.ed. Santa Maria, Brasil. p.189–212. 2016.

GIRARDELLO, V. C. et al. Benefícios do tráfego controlado de máquinas. **Granja** v.785, n.5, p.34–37, 2014.

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.38, n.4, p.1234–1244, 2014.

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Scientia Agraria.** v.18, n.2, p.86, 2017.

GUENETTE, K. G.; HERNANDEZ, G. R.. Tracking the influence of controlled traffic regimes on field scale soil variability and geospatial modeling techniques. **Geoderma** v.328, p.66–78, 2018.

ISBISTER, B. et al. Controlled Traffic Farming Technical Manual. Western Australia: Department of Agriculture and food, p.80, 2013.

KROULÍK, M.et al. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. **Soil and Tillage Research,** v.105, n.1, p.171–175, 2009.

LANZANOVA, M.et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** V.31, n.5, p.1131–1140, 2007.

LUHAIB, A. A. et al. Effect of controlled traffic farming on energy saving in Australian grain cropping systems. 2017, St. Joseph, MI: A**merican Society of Agricultural and Biological Engineers**, p.1-9, 2017.

MACHADO, T.M. et al. Pneus: Como minimizar a compactação do solo. **Cultivar Máquinas.** v. 142, p. 16–17, 2014.

MCHUGH, A. D.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Controlled traffic farming restores soil structure. **Soil and Tillage Research.** v.104, n.1, p.164–172, 2009.

MION, R. et al. Tensões aplicadas no solo pelas diferentes pressões do pneu de um trator agrícola. **Engenharia Agrícola**. v.36, n.1, p.63–77, 2016.

MORAES, M. T.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.53, n.4, p.464–477, 2018.

MOTTER, P. et al. PLANTIO DIRETO A tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. Itaipu Binacional, Foz do Iguaçu – PR. p,144, 2015.

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.** v.32, n.4, p.1723–1734, 2008

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research** v.148, p.119–126,2015.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing . Vienna, Austria. 2018.

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

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research** v.158, p.123–136, 2016.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma** v.110, n.1–2, p.131–146, 2002.

SANTOS, H. P. et al. Efeito de manejos de solo e de rotação de culturas de inverno no rendimento e doenças de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.12, p.2355–2361, 2000.

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Brasília-DF. Embrapa, p.353, 2013.

SILVA, A. R. et al. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um latossolo amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.30, n.2, p.207–216, 2006.

SATO, M. K. et al. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols**. International Agrophysics**. v.29, n.4, p.441–447, 2015.

SILVA, R. L.; DE MARIA, I. C. Erosão em sistema plantio direto: influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. v.15, n.6, p.554–561, 2011.

SILVEIRA, D. C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.34, n.3, p.659–667, 2010.

SIVARAJAN, S. et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**. v.175, p.234-243. 2018.

TEDESCO, M J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.174, 1995.

TREIN, C. R.; MACHADO, A. P.; LEVIEN, R. Compactação do solo por rodados, podemos evitá-la. **Revista Plantio Direto.** v.114, p. 23–34, 2009.

TULLBERG, J.; YULE, D. F.; MCGARRY, D. Controlled traffic farming-From research to adoption in Australia. **Soil and Tillage Research** v. 97, n. 2, p. 272–281, 2007.

TULLBERG, J. et al. Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. **Soil and Tillage Research**. v. 176, p.18–25, 2018.

TULLBERG, J. Tillage, traffic and sustainability-A challenge for ISTRO. **Soil and Tillage Research** v.111, n.1, p.26–32, 2010.

USDA. United States department of agriculture- foreign agricultural service. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/>. Acesso em: 26 maio. 2018.

VENABLES, W N; RIPLEY, B D. Modern Applied Statistics with S 4ª ed. New York: Springer, 2002.

7. ARTIGO 2. INTERFERÊNCIA DO TIPO E DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO DE MÁQUINAS SOBRE O SOLO, AS RAÍZES E A PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PLANTIO DIRETO

7.1 RESUMO

O sistema plantio direto tem sido modernizado e aperfeiçoado nas últimas décadas pela aplicação de técnicas de fertilização, plantio e genética. Já a utilização do tráfego tradicional traz imprecisão no direcionamento dos deslocamentos, aumentando a área trafegada e a compactação do solo. Ferramentas de agricultura de precisão para o gerenciamento de informações geoespaciais, aliadas ao planejamento das linhas de tráfego e ajustes de largura de trabalho e bitola de máquinas agrícolas permitem o tráfego controlado. A adoção visa concentrar a compactação nos mesmos locais em todas as atividades agrícolas a qual a área é submetida, buscando manter os locais livres de tráfego em condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas. Este estudo teve por objetivo avaliar os efeitos dos tipos e intensidades de tráfego sobre as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico típico e o desenvolvimento radicular e produtividade da soja (*Glycine max (L.)* Merr*.)* manejada sob plantio direto. Os tratamentos utilizados foram: tipo de tráfego: controlado (TC), alternado anual (TAA) e tradicional (TT). Para intensidades de tráfego: máximo há um ano (TMa1), máximo há dois anos (TMa2), médio (TMe), médio há um ano (TMe1), médio há dois anos (TMe2) e sem tráfego (ST). Foram avaliadas a densidade, macro, micro e porosidade total do solo, resistência do solo a penetração e comprimento do sistema radicular da soja nas camadas 0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15; 0,15 – 0,20; 0,20 – 0,30; 0,30 – 0,40 m. Os tratamentos afetaram os atributos físicos do solo, especialmente a macroporosidade, onde os valores observados em TC e TAA foram superiores aos observados nos demais tipos de tráfego na camada de 0 – 0,05 e 0,05 – 0,10 m. Os vetores que melhor explicam os resultados foram obtidos na camada 0 – 0,05 m, para as variáveis de produtividade, R1 e Macro e PT. O efeito dos sulcadores sob as antigas linhas de tráfego foi temporário, não sendo percebido após dois anos do deslocamento das linhas de tráfego. Já os resultados do comprimento radicular e produtividade de soja observados não foram significativos.

Palavras-chave: Propriedades físicas do solo. Distribuição vertical de raízes, compactação do solo. Tráfego controlado.

7.2 ABSTRACT

INTERFERENCE OF TYPE AND INTENSITY OF THE MACHINERY TRAFFIC ON SOIL, ROOTS, AND YIELD OF SOYBEAN UNDER THE NO-TILLAGE SYSTEM

The no-tillage system (NS) has been modernized and improved in the past few decades by techniques of fertilization, planting, and genetics. The use of traditional traffic is imprecise due to displacement, resulting in greater amount of traffic in areas causing soil compaction. Precision farming tools for managing geospatial information, combined with planning of traffic lines and forming width and gauge adjustments of

agricultural machines allow for controlled traffic. The strategy aims to concentrate the compaction in the same places for all agricultural activities to which the area is subjected, in order to keep areas free of traffic creating favorable conditions for plant development. The objective of this study was to evaluate the effects of types and intensities of agricultural traffic in Typic Hapludox soil, on the physical properties, root development, and yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) under the NS system. The levels of traffic were categorized into three types: traditional traffic (TT), controlled traffic (CTF), and annual alternate traffic (AAT). The intensities of the traffic were: without traffic (WT), medium traffic (Tme, Tme1, Tme2), and maximum traffic (Tma, Tma1, Tma2). Evaluation of the soil bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity, penetration resistance and root development in layers 0-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.15; 0.15-0.20; 0.20-0.30; 0.30-0.40 m was conducted. The treatments affected the physical attributes of the soil, especially the macroporosity; higher values were observed in the TC and AAT treatments in comparison to those exposed to other types of traffic, in the layers, 0-0.05 and 0,05-0.10 m. The vector that best explains the results were obtained in the 0-0.05 m layer, for the productivity variables, R1, macroporosity, and total porosity. The effect of the shanks under the old traffic lines was temporary, not being perceived after two years of the displacement of the traffic lines. There was no significant difference in the root length and soybean seed yield between the treatments.
Keywords: Physical soil properties. Vertical root distribution. Soil compaction. Controlled traffic farming.

7.3 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) é considerado um sistema conservacionista que contribui para a redução das perdas de solo por erosão hídrica, especialmente em países tropicais onde ocorrem chuvas de alto volume e intensidade. As perdas de solo por erosão são agravadas quando os picos de precipitação ocorrem após o solo já estar úmido (ELTZ *et al.*, 2001). No Brasil, a média de perda de solo por erosão varia entre 15 e 27 Mg ha^{-1} ano^{-1} (BORRELLI *et al.*, 2017; EMBRAPA, 2002) e normalmente taxas mais altas de perda de solo são verificadas quando a vegetação é removida sem que haja práticas posteriores conservacionistas (GUERRA *et al.*, 2014).

A perda e consequente degradação do solo avançam em caminho oposto ao das necessidades da população global, de maior demanda de alimentos e qualidade de vida. Em 2013 a população mundial era de 7,2 bilhões de pessoas, para 2050 e 2100 esses números são estimados em 9,6 e 10,9 bilhões, respectivamente, sendo grande parte deste crescimento populacional esperado em países subdesenvolvidos (UNITED NATIONS, 2013).

Soja, arroz, trigo e milho fornecem 66% das calorias consumidas mundialmente. Entretanto, o incremento produtivo anual destas culturas está bastante

abaixo do valor necessário para suprir adequadamente a população em 2050, 2,4 % ano^{-1} (WINGEYER *et al.*, 2015). Aproximadamente 90% do aumento de produção de alimentos necessário para suprir a população de 2050 é esperada para ocorrer em países em desenvolvimento, como o Brasil (FAO, 2009).

No Brasil, a busca por maior produção de alimentos nas últimas décadas ocorreu principalmente pela expansão de áreas agrícolas, avanços em genética de cultivares, intensificação da agricultura, desenvolvimento de máquinas e implementos, e adoção de técnicas de manejo do solo e tratos culturais. A evolução das máquinas e implementos visando seu melhor desempenho e eficiência resultou em equipamentos de maior tamanho e peso (GIRARDELLO, *et al.*, 2016, 2017; TREIN, 2009).

Em solos manejados sob SPD, é imprescindível o respeito aos princípios básicos do sistema (rotação de culturas, cobertura do solo e não revolvimento do solo). A fim de evitar problemas de ordem química e física do solo resultando na compactação, perdas de produtividade das culturas e retrocesso na conservação.

Neste sentido, tem sido frequentes os problemas de compactação em solos manejados sob SPD no sul do Brasil. Consequentemente, a redução da infiltração de água no solo e o desenvolvimento radicular das plantas surgem como empecilhos para ganhos de produtividade de soja em SPD. (LANZANOVA *et al.*, 2007). As cultivares soja (*Glycine max (L.)* Merr.*)* de menor ciclo, precoces, começaram a ser utilizadas início dos anos 2000 (BARNI, 2000). E atualmente quase a totalidade das cultivares dessa cultura são de ciclo precoce, fazendo com que a planta tenha menos possibilidades de recuperação após condições adversas de compactação do solo, deficiência de nutrientes e/ou água.

Diversas ações podem ser tomadas para romper as camadas de solo compactadas. A utilização de plantas com sistema radicular agressivo pode amenizar o problema. Plantas de cobertura podem contribuir para o melhoramento da estrutura física e fertilidade do solo, amenizar perda de nutrientes e erosão (CLARK, 2012). O nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), contribuiu para a descompactação do solo, rompendo camadas compactadas, criando galerias no solo e beneficiando as raízes das próximas culturas. Além disso, esta cultura estimula a ciclagem de nutrientes no solo e reduz o estabelecimento de plantas daninhas (CLARK, 2012; LAWLEY *et al.*, 2011).

O revolvimento do solo realizado por escarificador com o objetivo de romper camadas compactadas, e alguns apresentam a característica de conservar grande parte da palha sobre a superfície. Essas operações alteram a estrutura e modificam as condições em que ocorre o crescimento radicular (REICHERT *et al.,* 2003). Contudo, o revolvimento interrompe a sequência dos anos de cultivo sob SPD, mesmos os mantém grande parte da palha sobre a superfície. Além disso, não havendo a melhoria das práticas de manejo, o solo retornará às suas características anteriores, ou poderá ainda apresentar um agravamento dessas condições (CHAMEN, 2011).

Uma estratégia para evitar a compactação é a utilização das ferramentas que planejam o tráfego, como o tráfego controlado agrícola (TC). O qual consiste em gerenciar as máquinas a serem utilizadas e proteger o solo de mudanças na sua estrutura física (CHAMEN, 2015), objetivando melhorar as características físicas nos locais onde não ocorre tráfego (GUENETTE *et al.,* 2018). Buscando-se concentrar os deslocamentos dos implementos nos mesmos locais safra após safra. Para isso é feito o planejamento das linhas de tráfego (“tramlines”), adequando-se a largura dos implementos utilizando um sistema de localização por GNSS com correção (RTK ou RTX).

O sistema radicular das culturas é afetado por condições ambientais, as quais estão ligadas as características do material que deu origem ao solo, e ao manejo físico e químico ao qual ele é submetido. Os macroporos (0,08 a 5 mm (EMBRAPA, 2017) são os caminhos naturais para o crescimento e desenvolvimento radicular. Estes espaços entre os agregados do solo estão conectados uns aos outros em perfis sem problemas de compactação (CALONEGO & ROSOLEM, 2010). O adensamento do solo é um processo natural. Entretanto, as atividades agrícolas podem interferir, atenuando ou agravando esse processo, dependendo do manejo adotado (COSTA *et al.*, 2003). No plantio ocorre pequeno revolvimento dos primeiros centímetros do solo nas linhas de plantio, favorecendo o desenvolvimento inicial da cultura da soja (GIRARDELLO, *et al.*, 2017).

As demais atividades tendem a compactar o solo, o que pode limitar o crescimento e desenvolvimento radicular das culturas, principalmente das dicotiledôneas, como a soja, que possuem sistema radicular pivotante (ARVIDSSON & HÅKANSSON, 2014). Consequentemente, as raízes da soja ficam concentradas nas camadas superficiais do solo, ou seja, acima do impedimento físico (HOSSNE *et*

al., 2015), limitando a absorção de nutrientes e água devido ao reduzido volume de solo explorado pela planta. Em condições adversas de estiagem, frequentes na região sul do Brasil, essas condições podem ser ainda mais prejudiciais, uma vez que a planta tem sua capacidade de explorar o solo e sua resiliência reduzida. Como o aumento da compactação do solo verificado pela elevação da RP, prejudicando severamente a produtividade da cultura da soja que foi impactada de 10 a 38% pela variação de 3,0 a 5,0 MPa (GIRARDELLO. *et al.*, 2014). O presente trabalho foi desenvolvido em uma Latossolo conduzido sob SPD de longa duração. O SPD é adotado em grande escala nos Latossolos do Brasil, os quais representam 26,81 milhões km^2, ou seja, 31,61% do território brasileiro (EMBRAPA, SOLOS, 2011b).

Neste contexto, esse trabalho objetivou avaliar a influência da utilização de diferentes tipos e intensidades de tráfego agrícola após 2 anos de implementação, sobre características físicas do solo, comprimento e volume do sistema radicular e produtividade da cultura da soja em Latossolo sob SPD de longa duração no sul do Brasil.

7.4 MATERIAL E MÉTODOS

7.4.1 Localização do experimento e descrição do maquinário

O experimento foi localizado em uma área agrícola comercial de 89 ha no município de Carazinho, Rio Grande do Sul - Brasil, coordenadas UTM zona 22J 336043 m E, e 6875204m S, a 600 m de altitude em relação ao nível do mar. O clima local é do tipo Cfa segundo a classificação de Köppen, clima temperado húmido com verão quente (ALVARES *et al.*, 2013), com precipitações pluviais médias anuais de 1856 mm e temperatura média anual de 22,1ºC (EMBRAPA, 2012). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (SANTOS *et al.*, 2013), Ferralsol (WRB/FAO), Typic Hapludox (Soil Taxonomy). A textura é apresentada na Tabela 1, classificada como franco argilosa pelo triângulo textural (USDA, 2018a).

Tabela 1. Granulometria do Latossolo da área experimental a camada de 0 a 0,40m em Carazinho-RS.

Camada (m)	Argila	Silte	Areia
	- - - - - - - - - - - -	g kg^{-1}	- - - - - - - - - - - -
1 (0,00 - 0,05)	300,5	283,4	416,1
2 (0,05 - 0,10)	334,6	265,2	400,3
3 (0,10 - 0,15)	347,5	271,3	381,2
4 (0,15 - 0,20)	353,4	280,1	366,6
5 (0,20 - 0,30)	362,5	289,4	348,1
6 (0,30 - 0,40)	397,8	273,5	328,6

No local do estudo foi implementado o TC na safra 2015/16, com isso na época das avaliações a área apresentava um histórico de 26 meses de adoção do controle. O manejo em toda área experimental foi idêntico para as culturas e tipos de tráfego, sendo que foram estabelecidas no verão, a soja, e no inverno, a aveia. O TAA foi idêntico ao TC na safra 2015/16, enquanto nas safras 2016/17 e 2017/18 as linhas de tráfego foram deslocadas 1m em relação a primeira. O manejo das culturas, fertilizações e pulverizações dos tipos de tráfego foi idêntico, pois são utilizados os mesmos implementos para as atividades e na mesma área de 89 ha. Os implementos utilizados possuem dimensões de trabalho de 9,0 m para trator e colhedora, já o pulverizador 27,0 m. As bitolas não são iguais, contudo o rastro deixado pelos pneus é coincidente, devido suas larguras. O trator e colhedora tem dimensões da bitola de 3,05m para o eixo dianteiro e traseiro e pneus de maior largura (dimensões de 30,50” aro 32”). O pulverizador com bitola de 2,74m para ambos eixos e pneus estreitos (12,40” aro 36”), para bitola e largura dos pneus respectivamente. O peso dos implementos com capacidades máximas de carga com lastros: colhedora (~ 12600 kg eixo^{-1}), pulverizador (~4500 kg eixo^{-1}), trator (~7000 kg eixo^{-1}).

As duas semeadoras utilizadas foram do modelo SSM27 marca Semeato, modelo que possui opções de regulagem do espaçamento entre linhas e possibilita a utilização de grãos finos e grossos. No presente estudo, as semeadoras utilizadas foram unificadas por um cabeçalho tandem e eram operadas tanto nas culturas de verão como de inverno. Cada semeadora tinha largura de trabalho de 4,5m, e 27 linhas espaçadas a 0,17 m para cultura de inverno, enquanto no verão reguladas para operarem com 13 linhas de 0,34m cada. As semeadoras eram desencontradas no cabeçalho tandem, ficando uma mais à frente da outra, e por esse motivo eram utilizados pistões hidráulicos para correção do alinhamento. As semeadoras eram

modificadas para semeadura da aveia, foram utilizados sulcadores que realizavam a escarificação no solo até aproximadamente 0,23 m, exatamente na linha de tráfego dos pneus. Com isso, a configuração ao longo das linhas foi diferente, utilizavam-se 24 discos duplos de 0,406 e 0,381 m, junto com 3 discos de 0,70 m e 3 sulcadores do tipo hastes alinhados com os pneus do trator.

As fertilizações e tratos culturais foram os mesmos que o produtor utilizou na propriedade, sendo adotado em todos os tratamentos. A cultura avaliada foi a soja (*Glycine max (L.) Merr.)* cultivar DuPont Pioneer® 95R51, semeada no final de novembro e população estabelecida de 7 plantas por metro linear. O espaçamento entre fileiras utilizado foi 0,34m, totalizando 200 mil plantas ha^{-1}. A adubação para a cultura foi composta por 120 kg ha^{-1} de Mono-Amônio-Fosfato (MAP 11-52-00), e por aplicação de 130 kg ha^{-1} em cobertura de cloreto de potássio (KCl 60%).

7.4.2 Desenho Experimental e Tratamentos

O desenho experimental foi planejado seguindo uma estrutura hierárquica de maneira que o primeiro nível foram as faixas contendo os tratamentos [tipo de tráfego (intensidade de tráfego)], dentro de cada faixa foram feitas as repetições; e ainda para cada repetição foram analisadas seis profundidades.

O fator tipo de tráfego possui os níveis: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). O fator intensidade de tráfego apresenta os níveis: sem tráfego (ST), tráfego médio (trator) (TMe) e tráfego máximo (trator + pulverizador) (TMa).

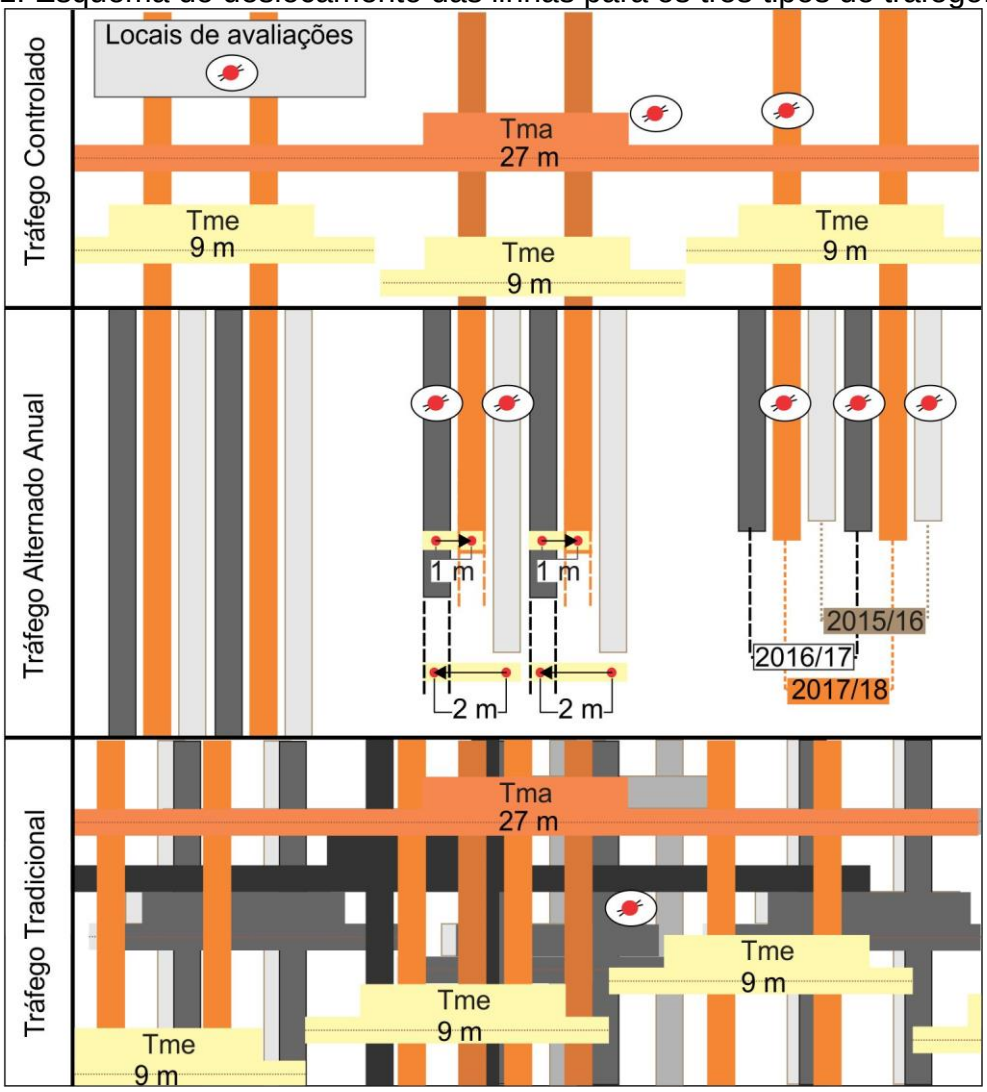
Os deslocamentos do TAA foram efetivados na primeira pulverização ocorrida na cultura da aveia em 2016 e 2017. Com isso cada safra da cultura da soja utilizou diferentes linhas de tráfego, assim as intensidades TMe e TMa foram deslocadas dois metros entre as safras 2015/16 (TMa2 e TMe2) e 2016/17 (TMa1 e TMe1), e um metro entre as safras 2016/2017 e 2017/18 (Figura 1).

As passadas das máquinas foram contabilizadas para cada tratamento desde a implantação do tráfego controlado (Tabela 2). Para o TT foi atribuído a média dos demais tráfegos em virtude da falta de rastreabilidade dos implementos.

Tabela 2. Número total de passadas dos implementos em cada tratamento após 28 meses de adoção do tráfego controlado.

Tratamentos	Pulverizador	Trator	Colhedora	Total
TC ST	0	0	0	0
TC Tme	0	5	3	8
TAA Tma1	7	2	1	10
TAA Tma2	5	2	1	8
TAA Tme	0	1	1	2
TAA Tme1	0	2	1	3
TAA Tme2	0	2	1	3
TT ST	2	2	1	5

Figura 1. Esquema do deslocamento das linhas para os três tipos de tráfego.



TC – Tráfego controlado, TAA – Tráfego alternado anual, TT – Tráfego tradicional. Para TAA, cor cinza representa as linhas de tráfego da safra 1 (2015/16), preto safra 2 (2016/17) e laranja safra 3 (2017/18). As larguras de trabalho dos implementos: pulverizador (Tma) 27 m, e trator/colhedora (Tme) 9 m. Os símbolos (elipses com círculo vermelho) indicam os locais de coleta e avaliação representados para os três tipos de tráfego.

7.4.3 Tratos culturais Amostragem de planta, e solo e análises laboratoriais

A produtividade da soja foi determinada coletando-se manualmente 3,0 m lineares de uma fileira, repetindo-se essa avaliação 15 vezes em cada tratamento. A área coletada em cada parcela foi de 1,02 m^2, e tiveram a umidade corrigida a 13%, e as avaliações foram convertidas para kg ha^{-1}.

As avaliações no florescimento da soja ocorreram durante os dias 30 e 31 de janeiro de 2018. Nessas datas, foram feitas coletas do sistema radicular de plantas, e a primeira avaliação de RP (RP 1). Após a colheita mecânica, no dia 17 de abril de 2018, foi realizada a 2ª avaliação de RP (RP 2) e foram coletados anéis volumétricos para determinação de macroporosidade, microporosidade e densidade do solo. As avaliações ocorreram em 24 locais, com 3 repetições para cada tratamento, as camadas consideradas para coletas e avaliações foram: 0 – 0,05; 0,05 – 0,10; 0,10 – 0,15; 0,15 – 0,20; 0,20 – 0,30; 0,30 – 0,40 m.

A amostragem das raízes da cultura da soja foi realizada em estágio R2, utilizando o método do monolito (adaptado de BÖHM, 1979). A estrutura para coleta das raízes possuía dimensões de 0,30 – 0,40 – 0,02 m com pregos espaçados a cada 0,05 m e continha uma malha de aço inoxidável de 2 mm, com o objetivo de ajudar a manter as raízes da soja em seu lugar durante a lavagem das mesmas. Para retirada do monolito foram abertas trincheiras de aproximadamente 0,50m de profundidade, 0,40m de largura e 0,50m de diâmetro a uma distância de 0,10m do caule da planta a ser coletada. Os pregos da estrutura da tábua foram inseridos na parede da trincheira, perpendicularmente a linha de plantio da soja, sendo retirado o monolito com as raízes preservadas e volume de 0,24 m^3, sendo envoltos com filme de PVC 0,01mm para seu transporte e armazenamento.

Em laboratório os monolitos foram colocadas em caixas plásticas de 33,6l (dimensões 0,55x0,18x0,34m) onde foram completadas com água para umedecimento. Logo após a água foi substituída por uma solução de NaOH a 1%, e os monolitos permaneceram por 6h nesta solução para promover a dispersão da argila do solo. O tempo em solução e a concentração da mesma visaram minimizar os danos às raízes durante sua lavagem em água. Após, com as raízes limpas, e cortadas em seis camadas equivalentes às dos anéis de densidade do solo, e armazenadas no freezer (-20 °C) para conservação até o momento da análise.

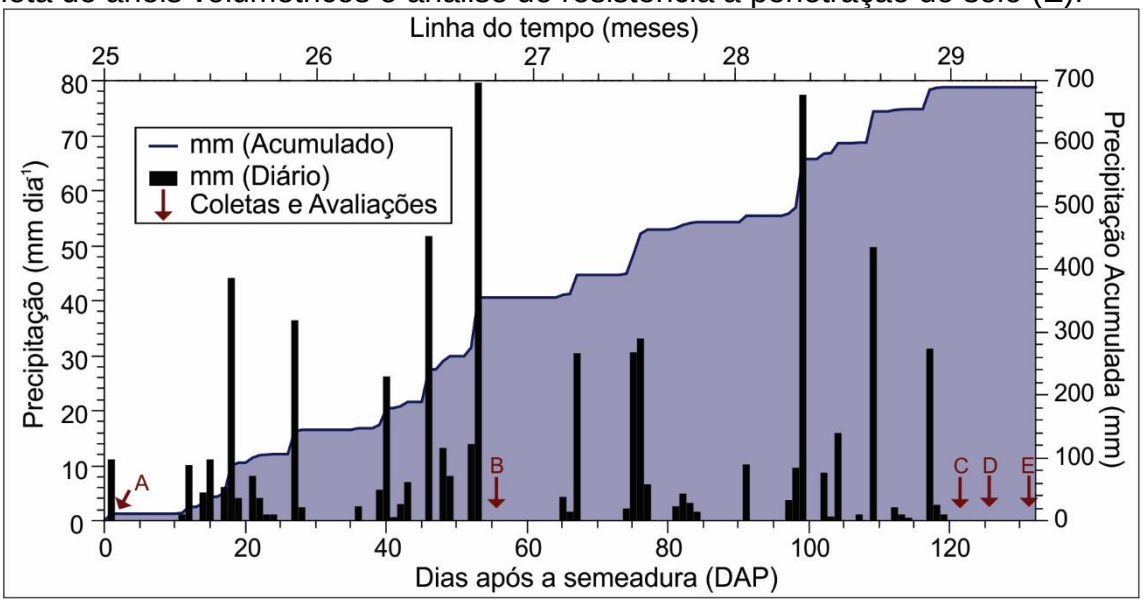
O sistema radicular foi digitalizado com um scanner de área digitalizável de 0,29 x 0,42 m (Epson Expression 12000XL, Epson América, Inc., Long Beach, CA) na resolução de 800 dpi. As imagens geradas foram analisadas usando o software WinRhizo Arabidopsis (Régent Instruments, Québec City, QC, Canadá). As classes de raízes foram estabelecidas com base no diâmetro das raízes e divididas em quatro classes: RT(raízes totais), R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm), conforme proposto por LI *et al.* (2017).

Anéis volumétricos foram coletados para determinação da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade. As dimensões dos anéis utilizados para a coleta de solo eram 0,04 m de altura e 0,06 m de diâmetro. Para a determinação da macroporosidade utilizou-se a tensão de -6 kPa, enquanto para microporosidade as amostras foram para a estufa onde permaneceram por 48h a 105°C (EMBRAPA, 2011a).

As avaliações de resistência mecânica do solo a penetração foram realizadas com o penetrômetro SoloTrack (PLG5300) Falker. Os registros são determinados através de uma célula de carga, enquanto a inserção da haste é automatizada a velocidade nominal de inserção de 0,024 m s^{-1}. Foi utilizado cone tipo 2 (diâmetro de 12,83 mm), com ângulo 30° (ASAE, 1976). O equipamento foi configurado para registrar leituras a cada 0,01 m, da superfície do solo até a profundidade de 0,40m.

Os registros de pluviosidade foram realizados por 4 estações pluviométricas nas unidades de gerenciamento da cooperativa Cotrijal, todas próximas à área do experimento, os quais são disponibilizados gratuitamente online na seção de histórico de chuvas. Os registros de precipitação diária, precipitação acumulada, e os dias onde foram feitas avaliações e coletas a campo são apresentados na Figura 2.

Figura 2. Precipitação diária e acumulada no período de 140 dias, referente ao ciclo da cultura da soja entre os meses 25 e 29. Os meses que foram realizadas as avaliações e coletas identificadas a partir da data de implantação do TC: semeadura da soja (A), RP e coleta de Raízes (B), colheita Manual (C); colheita Mecânica (D); coleta de anéis volumétricos e análise de resistência a penetração do solo (E).



Durante o ciclo da cultura a precipitação média foi de 5,83 mm dia^{-1}, o mês menos chuvoso foi fevereiro (119,9 mm) o qual coincide com o estádio de florescimento e enchimento de grãos. No mês de janeiro, ocorreram as maiores precipitações acumuladas (248,9 mm). O intervalo máximo sem precipitação foi de 11 dias, ocorrido entre os meses de janeiro e fevereiro. Esse período foi antecedido pelo acumulado de 114,4 mm em uma semana.

7.4.4 Análise estatística

O modelo estatístico considerado foi um modelo misto onde efeito de tráfego, camada e a interação tráfego x camada foram tratadas como efeito fixo; e o efeito da faixa de intensidade de tráfego, do tratamento dentro da faixa [tráfego (faixa)], e da camada dentro da interação faixa x tráfego [camada (faixa x tráfego)] foram considerados com efeitos aleatórios.

A normalidade e distribuição dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, quando os dados não foram normais utilizou-se a função Box-Cox (VENABLES, 2002). Foi realizada análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a nível de significância $p<0,05$.

A Análise de Redundância (RDA) foi utilizada para verificar a fração de explicação das variáveis de propriedades de solo sobre o comprimento radicular nas classes de diâmetro estabelecidas e produtividade da cultura da soja. A RDA é composta por uma regressão linear múltipla seguida por uma análise de componentes principais (PCA), em que a resposta se dá na matriz.

A análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2018), através do pacote lm4 (KUZNETSOVA, 2017) e geração de figuras com o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta o resumo da ANOVA para os efeitos dos fatores tipos de tráfego, intensidade de tráfego e camada do solo sobre as variáveis de planta e solo analisadas.

Tabela 3. Resumo ANOVA – comprimento de raízes total (RT) e nas classes de diâmetro R1, R2 e R3, resistência do solo a penetração (RP), densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma) e microporosidade (Mi) e porosidade total (PT). Valores de Fisher (F) e níveis de significância (*P*) para os fatores: Tráfego, intensidade, tráfego intensidade, camada, tráfego X camada, intensidade X camada e tráfego intensidade X camada.

Fatores	Classes								RP				Anéis volumétricos								Soja	
	RT		R1		R2		R3		1		2		DS		Macro		Micro		PT			
	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*	F	*P*
T	0,25		0,32		0,29		0,29		0,71		0,63		1,66		2,30		0,49		3,71		0,30	
I	4,04	*	0,83		2,50		4,29	*	1,59		3,20	*	0,59		2,43		3,89	*	0,87		0,36	
T I	2,45	*	0,61		1,93		2,45	*	1,54		2,58	*	0,81		2,65		3,92	**	1,78		0,30	
C	67,42	***	53,00	***	56,48	***	61,54	***	216,41	***	290,64	***	49,22	***	45,86	***	32,06	***	58,52	***	-	-
T X C	0,29		1,18		0,37		0,37		1,67		1,28		2,30	*	3,16	**	0,98		3,15	**	-	-
I X C	1,41		1,34		1,02		1,53		1,34		2,28	**	0,79		1,17		1,22		0,90		-	-
T I X C	1,08		1,20		0,73		1,20		1,67	*	1,69	*	2,18	**	4,12	***	1,66	*	2,52	***	-	-

T – tráfego, I – intensidade, T I – tráfego intensidade, C – camada; Interações T X C – tráfego X camada, I X C – intensidade X camada, T I X C – intensidade de tráfego X camada; RP A – Avaliação realizada no florescimento da cultura da soja, RP B – avaliação realizada após a colheita da soja, DS – densidade, Macro – macroporosidade, Micro – microporosidade, PT – porosidade total do solo. Indica correlação significativa (* P < 0,05 – 0,01; ** P < 0,01 – 0,001; *** P< 0,001).

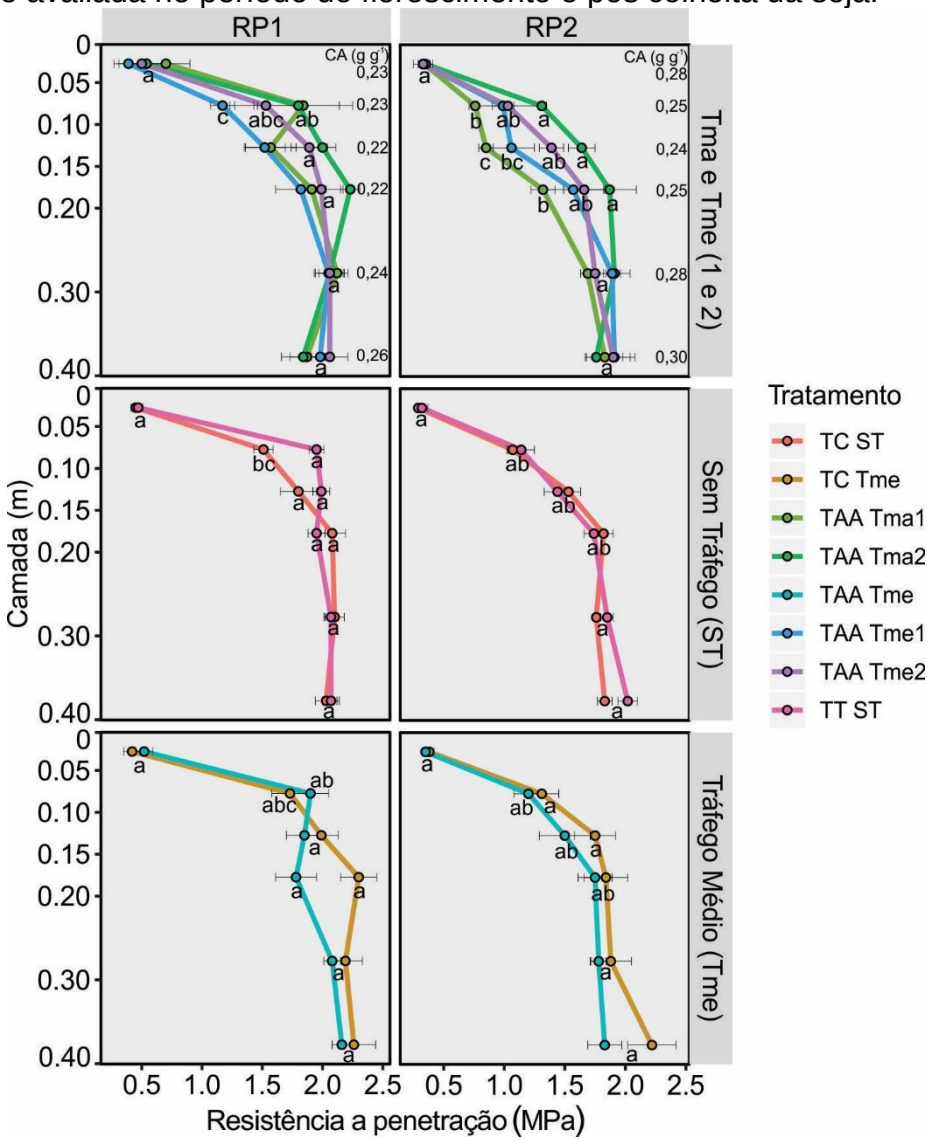
7.5.1 Características físicas do solo

Com base na avaliação estratificada da RP em camadas do solo e em duas épocas distintas (florescimento e pós colheita) é possível verificar o efeito do deslocamento dos implementos sobre o solo ao final de um ciclo produtivo, assim

torna-se possível comparar entre as épocas se no decorrer do ciclo o quanto o efeito da compactação causada pelos implementos é prejudicial ao solo, ao desenvolvimento radicular e a produtividade da cultura da soja.

Efeito significativo dos tratamentos na camada de 0,05 – 0,10 m foi observado sobre a RP avaliada no florescimento da cultura da soja (RP1) (Figura 3), já na RP avaliada após a colheita da cultura da soja (RP2) as diferenças foram observadas nas camadas 0,05 – 0,10, 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m. Para os tratamentos TAA com tráfego antigo (Tma1, Tma2, Tme1 e Tme2), ou seja que nos anos anteriores foram linha de tráfego, foi observado redução da RP1 para a camada 0,05 – 0,10, e 0,10 – 0,15 m na RP2 para TAA Tme1. No tratamento TAA Tma1 foram registrados as menores médias de RP para as camadas 0,05 – 0,10, 0,10 – 0,15 e 0,15 – 0,20 m 0,15 e 0,20 m (0,76, 0,85 e 1,32 MPa). Tais resultados indicam que a redução da RP nos locais onde foram linhas de tráfego (TAA) somente foi percebida após um ano. Após dois anos os efeitos dos sulcadores sobre a RP não são percebidos nas linhas. Foi observado aumento (19, 16 e 9 %) da RP nas camadas de 0,05 a 0,20 m em TAA Tma2 em comparação aos demais tratamentos (Figura 3). Drescher et al. (2012) e Sivarajan et al. (2018) observaram resultados semelhantes em solo de textura argilosa, e solos com diferentes texturas (arenosa a argilosa) similares ao do presente estudo em solo de textura franco argilosa. Os primeiros autores relatam o potencial efêmero na melhora da estrutura do solo pelo uso da escarificação, pois o efeito residual é de até dois anos e meio, não afetando a produtividade da soja. Já os autores que trabalharam em diferentes texturas de solo encontraram variabilidade de 1,03 a 1,56 MPa na camada de 0 – 0,45 m.

Figura 3. Resistência a penetração do solo em função do tipo e intensidade de tráfego e profundidade avaliada no período do florescimento e pós colheita da soja.



RP1 – Florescimento, e RP2 – pós-colheita mecanizada da soja; CA – Conteúdo de água com base no peso seco (g g^{-1}).

Em solos intemperizados subtropicais manejados sobre SPD normalmente são encontrados maiores valores de RP entre as camadas de 0,05 a 0,15 m. Esta condição de compactação do solo é usualmente atribuída ao trânsito de implementos sobre solos com umidade excessiva (SUZUKI *et al.*, 2008), prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular de culturas como soja e milho (VALADÃO *et al.*, 2015). A partir da profundidade de 0,10 m são observados valores de RP superiores a 1,5 MPa em grande parte dos tratamentos (Figura 3)

Para Chamen (2011) o TC sempre exibiu menor RP quando comparado ao tráfego aleatório. Botta *et al.*, (2010, 2016) observaram que valores de RP acima de 2,46 MPa reduziram o peso seco do sistema radicular e a produtividade da soja sob

SPD, mas não influenciaram a emergência das plântulas. Já Girardello *et al.* (2014) encontraram em Latossolo Vermelho efeitos limitantes para soja, quando a RP máxima do perfil do solo foi superior a 3,0 MPa. Grandes perdas produtivas foram relatadas pelos autores quando os valores de RP ultrapassaram 5,0 MPa. Neste trabalho cerca de 1 % das avaliações foram registradas acima de 3 MPa, sendo essas ocorrências registradas entre as camadas das profundidades de 0,05 e 0,20 m.

Segundo Sato *et al*. (2015) valores de RP entre 2 e 3 MPa podem afetar distintamente o sistema radicular da soja, dependendo do teor de argila do solo. Em solos argilosos os autores não observaram diferença no comprimento, já em solo franco argilo-arenoso os valores de RP entre 2 e 3 MPa ocasionaram redução do comprimento radicular da soja variando entre 19 e 35 % quando comparados a valores de RP < 2 MPa. Em trabalho com registros de RP semelhantes ao presente estudo a cultura do milho, muito utilizada em Latossolos no sul do Brasil, as avaliações de 1,6 MPa não foram limitantes ao desenvolvimento radicular e produtividade da cultura (MORAES *et al*. 2018).

Os dados de DS, Macro, Micro e PT do solo estão apresentados nas Tabelas 4 e 5. O efeito significativo do fator camada é observado em todas as variáveis avaliadas, tendo como destaque a maior DS e a menor Macro e PT na camada de 0,10 – 0,15 m. O fator intensidade de tráfego teve efeito apenas sobre Micro, sendo os menores valores de Micro observados em Tma1, enquanto que o maior valor de Micro foi observado no tratamento que manteve a linha de tráfego constante (Tme).

Para a interação dos fatores tráfego x camada o tratamento com a maior macroporosidade e a menor DS entre os tratamentos observados foi TC (0 – 0,05 m). Resultado semelhante é observado para os dados de PT que para camada de 0 – 0,05 m o TC apresenta 55,47 cm cm^{-3}.

Tabela 4. Avaliações de resistência a penetração no florescimento e pós colheita, anéis volumétricos para avaliação de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo para os fatores tráfego, intensidade, camada, intensidade de tráfego, e trafego x camada.

Fatores		RP1	RP2	DS	Macro	Micro	PT
		- - - -	Kpa - - - -	g cm^{-3}	- - - - - - - - - - - - -	cm $^{-3}$ - - - - - - - - - - - - -	
Tráfego							
	TC	1,71 ns	1,44 ns	1,36 ns	7,92 ns	38,75 ns	46,67 ns
	TAA	1,66	1,33	1,38	7,37	38,14	45,51
	TT	1,75	1,42	1,40	6,28	38,09	44,37
Intensidade							
	ST	1,71 ns	1,40 ab	1,37 ns	7,61 ns	38,11 ab	45,72 ns
	Tma1	1,67	1,13 b	1,36	9,16	36,61 b	45,78
	Tma2	1,75	1,47 a	1,41	6,25	38,38 ab	44,63
	Tme	1,77	1,48 a	1,39	5,93	39,40 a	45,33
	Tme1	1,49	1,29 ab	1,35	8,10	38,71 ab	46,81
	Tme2	1,67	1,34 ab	1,38	7,34	38,21 ab	45,55
Camada							
	0 - 0,05	0,49 c	0,33 e	1,24 e	13,66 a	37,46 c	51,12 a
	0,05 - 0,10	1,69 b	1,1 d	1,41 bc	7,85 b	37,44 c	45,29 b
	0,10 - 0,15	1,84 b	1,41 c	1,48 a	5,21 c	36,56 c	41,77 c
	0,15 - 0,20	2,01 a	1,71 b	1,44 ab	5,31 c	37,68 c	42,99 c
	0,20 - 0,30	2,09 a	1,81 ab	1,37 c	5,92 bc	39,68 b	45,60 b
	0,30 - 0,40	2,04 a	1,91 a	1,32 d	5,95 bc	41,06 a	47,01 b
Intensidade de Tráfego							
TC	ST	1,66 ns	1,38 ab	1,34 ns	8,94 ns	38,13 bc	47,07 ns
TC	Tme	1,82	1,56 a	1,38	5,89	39,99 a	45,87
TAA	Tma1	1,67	1,13 b	1,36	9,16	36,61 c	45,78
TAA	Tma2	1,75	1,47 ab	1,41	6,25	38,38 abc	44,63
TAA	Tme	1,71	1,40 ab	1,39	5,98	38,81 ab	44,79
TAA	Tme1	1,49	1,29 ab	1,35	8,10	38,71 abc	46,81
TAA	Tme2	1,67	1,34 ab	1,38	7,34	38,21 abc	45,55
TT	ST	1,75	1,42 ab	1,40	6,28	38,09 bc	44,37
Tráfego X Camada							
TC	0 - 0,05	0,44 ns	0,32 ns	1,15 b	18,37 a	37,10 ns	55,47 a
TC	0,05 - 0,10	1,58	1,15	1,43 a	7,26 a	37,81	45,07 a
TC	0,10 - 0,15	1,86	1,60	1,49 a	5,16 a	37,02	42,18 a
TC	0,15 - 0,20	2,16	1,82	1,42 a	4,84 a	38,75	43,59 a
TC	0,20 - 0,30	2,13	1,80	1,35 a	5,62 a	40,44	46,07 a
TC	0,30 - 0,40	2,10	1,96	1,30 a	6,28 a	41,37	47,64 a
TAA	0 - 0,05	0,53	0,34	1,27 a	12,75 b	37,24	49,99 b
TAA	0,05 - 0,10	1,65	1,06	1,40 a	8,17 a	37,61	45,78 a
TAA	0,10 - 0,15	1,77	1,29	1,48 a	5,25 a	36,61	41,86 a
TAA	0,15 - 0,20	1,95	1,63	1,43 a	5,61 a	37,18	42,79 a
TAA	0,20 - 0,30	2,07	1,80	1,37 a	6,39 a	39,38	45,77 a
TAA	0,30 - 0,40	1,99	1,85	1,32 a	6,04 a	40,85	46,89 a
TT	0 - 0,05	0,47	0,32	1,33 a	8,89 b	38,55	47,44 b
TT	0,05 - 0,10	1,95	1,14	1,39 a	7,92 a	36,48	44,40 a
TT	0,10 - 0,15	1,99	1,44	1,49 a	5,20 a	35,74	40,94 a
TT	0,15 - 0,20	1,95	1,74	1,47 a	5,28 a	37,32	42,60 a
TT	0,20 - 0,30	2,07	1,85	1,40 a	5,17 a	39,32	44,48 a
TT	0,30 - 0,40	2,07	2,02	1,35 a	5,25 a	41,14	46,38 a

Para interação dos fatores intensidade de tráfego X camada os valores de DS variaram de 1,08 a 1,49 g cm^{-3}, sendo observado diferenças entre os tratamentos apenas na camada 0 – 0,05 m (Tabela 5). O tratamento que apresentou menor DS nessa camada foi o TC ST, enquanto o tratamento TAA Tma2 apresentou DS 27,8 % superior. Valores de DS acima de 1,51 g cm^3 são considerados críticos para o desenvolvimento radicular em solos argilosos, podendo reduzir em até 50 % o desenvolvimento radicular da soja (SATO *et al.*, 2015). No presente trabalho os tratamentos avaliados resultaram, em média, em valores de DS próximos ao crítico na camada 3. Para SEKI *et al.* (2015) com a utilização de sulcadores e subsoladores houve a redução da DS de 1,32 a 1,41 g cm^3 para 1,19 a 1,34 g cm^3 para a camada de 0,10 – 0,20 m, no entanto, a redução da DS não influenciou na produtividade do milho.

Os maiores valores de Macro para a camada 0 – 0,05 m foram observados em TC ST, cerca de 96,8 % superior à média dos demais tratamentos. Na camada 0,05 – 0,10 o maior valor de Macro foi observado em TAA Tma1, o qual foi cerca de 59 % superior à média dos demais tratamentos. Tal resultado é atribuído à ação dos sulcadores. Em Tma2 o efeito sobre a Macro não foi mantido em virtude da ação do tempo e rearranjo das partículas do solo. Neste sentido, trabalhos estudando escarificações isoladas, sem controle de tráfego, reportaram efeitos sobre a DS pouco duráveis, em torno de 2 anos (CAMARA; KLEIN, 2005; DRESCHER, *et al.*, 2012, 2016; GIRARDELLO, *et al.*, 2011).

Tabela 5. Avaliações de resistência a penetração no florescimento e pós colheita, anéis volumétricos para avaliação de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo para os fatores intensidade de tráfego x camada.

Fatores		RP1	RP2	DS	Macro	Micro	PT
		- - - -	Kpa - - - -	g cm^{-3}	- - - - - - - - - - - - -	cm $^{-3}$ - - - - - - - - - - - - -	
Intensidade de Tráfego	X Camada						
TC ST	0 - 0,05	0,45 a	0,29 a	1,08 c	22,99 a	35,05 d	58,03 a
TC ST	0,05 - 0,10	1,51 bc	1,07 ab	1,42 a	8,05 ab	37,02 ab	45,08 a
TC ST	0,10 - 0,15	1,80 a	1,53 ab	1,49 a	5,22 a	36,50 a	41,73 a
TC ST	0,15 - 0,20	2,08 a	1,82 ab	1,42 a	5,19 a	38,69 a	43,88 a
TC ST	0,20 - 0,30	2,10 a	1,76 a	1,35 a	5,91 a	40,19 a	46,10 a
TC ST	0,30 - 0,40	2,03 a	1,83 a	1,30 a	6,27 a	41,32 a	47,59 a
TC Tme	0 - 0,05	0,42 a	0,38 a	1,29 ab	9,12 cd	41,21 a	50,33 bc
TC Tme	0,05 - 0,10	1,73 abc	1,31 a	1,44 a	5,68 ab	39,38 ab	45,07 a
TC Tme	0,10 - 0,15	1,99 a	1,75 a	1,48 a	5,03 a	38,05 a	43,09 a
TC Tme	0,15 - 0,20	2,30 a	1,84 ab	1,42 a	4,14 a	38,87 a	43,01 a
TC Tme	0,20 - 0,30	2,19 a	1,88 a	1,35 a	5,04 a	40,96 a	46,01 a
TC Tme	0,30 - 0,40	2,26 a	2,22 a	1,30 a	6,30 a	41,45 a	47,75 a
TAA Tma1	0 - 0,05	0,70 a	0,34 a	1,29 ab	14,64 bc	35,19 cd	49,83 bc
TAA Tma1	0,05 - 0,10	1,84 ab	0,76 b	1,35 a	11,57 a	35,26 b	46,82 a
TAA Tma1	0,10 - 0,15	1,57 a	0,85 c	1,46 a	6,32 a	35,68 a	42.00 a
TAA Tma1	0,15 - 0,20	1,91 a	1,32 b	1,41 a	7,48 a	36,41 a	43,89 a
TAA Tma1	0,20 - 0,30	2,12 a	1,69 a	1,37 a	7,21 a	38,20 a	45,41 a
TAA Tma1	0,30 - 0,40	1,87 a	1,83 a	1,28 a	7,75 a	38,94 a	46,69 a
TAA Tma2	0 - 0,05	0,54 a	0,35 a	1,38 a	7,82 d	37,93 abcd	45,75 c
TAA Tma2	0,05 - 0,10	1,80 ab	1,31 a	1,45 a	7,68 ab	36,71 ab	44,39 a
TAA Tma2	0,10 - 0,15	2.00 a	1,64 a	1,48 a	4,48 a	36,96 a	41,44 a
TAA Tma2	0,15 - 0,20	2,23 a	1,87 a	1,45 a	4,95 a	37,01 a	41,96 a
TAA Tma2	0,20 - 0,30	2,06 a	1,91 a	1,35 a	7,36 a	39,81 a	47,17 a
TAA Tma2	0,30 - 0,40	1,84 a	1,76 a	1,34 a	5,22 a	41,88 a	47,10 a
TAA Tme	0 - 0,05	0,52 a	0,35 a	1,28 ab	9,30 cd	39,57 ab	48,87 bc
TAA Tme	0,05 - 0,10	1,90 ab	1,20 ab	1,42 a	4,79 b	39,66 a	44,44 a
TAA Tme	0,10 - 0,15	1,85 a	1,50 ab	1,49 a	4,73 a	36,56 a	41,29 a
TAA Tme	0,15 - 0,20	1,78 a	1,75 ab	1,45 a	5,08 a	37,02 a	42,1 a
TAA Tme	0,20 - 0,30	2,08 a	1,78 a	1,40 a	5,71 a	39,04 a	44,75 a
TAA Tme	0,30 - 0,40	2,16 a	1,83 a	1,32 a	6,26 a	41.00 a	47,27 a
TAA Tme1	0 - 0,05	0,39 a	0,33 a	1,14 bc	17,33 ab	36,62 bcd	53,95 ab
TAA Tme1	0,05 - 0,10	1,17 c	0,99 ab	1,38 a	7,66 ab	39,14 ab	46,80 a
TAA Tme1	0,10 - 0,15	1,52 a	1,06 bc	1,47 a	5,91 a	36,44 a	42,34 a
TAA Tme1	0,15 - 0,20	1,82 a	1,57 ab	1,45 a	5,56 a	37,91 a	43,47 a
TAA Tme1	0,20 - 0,30	2,05 a	1,89 a	1,33 a	6,30 a	40,87 a	47,17 a
TAA Tme1	0,30 - 0,40	1,98 a	1,91 a	1,29 a	5,87 a	41,27 a	47,14 a
TAA Tme2	0 - 0,05	0,50 a	0,33 a	1,25 abc	14,66 bc	36,87 bcd	51,53 bc
TAA Tme2	0,05 - 0,10	1,53 abc	1,03 ab	1,40 a	9,15 ab	37,28 ab	46,42 a
TAA Tme2	0,10 - 0,15	1,89 a	1,39 abc	1,47 a	4,83 a	37,41 a	42,24 a
TAA Tme2	0,15 - 0,20	1,99 a	1,66 ab	1,41 a	4,98 a	37,55 a	42,54 a
TAA Tme2	0,20 - 0,30	2,06 a	1,75 a	1,40 a	5,37 a	38,97 a	44,34 a
TAA Tme2	0,30 - 0,40	2,06 a	1,90 a	1,35 a	5,08 a	41,16 a	46,24 a
TT ST	0 - 0,05	0,47 a	0,32 a	1,33 a	8,89 cd	38,55 abc	47,44 c
TT ST	0,05 - 0,10	1,95 a	1,14 ab	1,39 a	7,92 ab	36,48 ab	44,40 a
TT ST	0,10 - 0,15	1,99 a	1,44 ab	1,49 a	5,20 a	35,74 a	40,94 a
TT ST	0,15 - 0,20	1,95 a	1,74 ab	1,47 a	5,28 a	37,32 a	42,60 a
TT ST	0,20 - 0,30	2,07 a	1,85 a	1,40 a	5,17 a	39,32 a	44,48 a
TT ST	0,30 - 0,40	2,07 a	2,02 a	1,35 a	5,25 a	41,14 a	46,38 a

Drescher *et al.* (2017) relataram redução da DS quando a operação de semeadura atingiu 0,15 m de profundidade do solo. Girardello *et al.* (2017b) relataram

alívio da compactação do solo pelo efeito dos sulcadores da semeadora, favorecendo assim, o desenvolvimento inicial da cultura da soja.

Os tratamentos diferiram quanto aos valores de Micro nas duas primeiras camadas de solo. O valor de Micro em TC Tme foi 11 % superior à média dos demais tratamentos na camada 0 – 0,05 m. Na camada 0,05 – 0,10 m, o valor de Micro em TAA Tme foi 6,3 % superior à média dos demais tratamentos. MORAES *et al.* (2018) encontraram resultados semelhantes em um Argissolo de textura média onde houve trânsito de máquinas, observando aumento de 5 e 4 % nos valores de Micro nas camadas de 0 – 0,05 m e 0,05 – 0,10 m, respectivamente, comparado a locais sem tráfego. Calonego *et al.* (2017) verificaram alterações significativas na Micro em camadas até 0,40 m como resultado do cultivo de crotalária (Crotalaria *juncea* (L.)). Os resultados observados pelos autores foram comparáveis aos obtidos por escarificação mecânica quanto ao aumento da Macro e redução da Micro.

7.5.2 Avaliação do sistema radicular da soja

A Tabela 6 mostra os resultados dos parâmetros radiculares da soja de acordo com a ANOVA, para os fatores tráfego, intensidade, camada, intensidade de tráfego e a interação tráfego X camada. São apresentados para os fatores os quais apresentam diferença significativa (P <0,05) os resultados para o teste de Tukey.

Tabela 6. Comprimento total das raízes (RT) de soja e comprimento radicular nas classificados nas classes de diâmetro R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm) para os fatores tráfego, intensidade, camada, intensidade de tráfego, e trafego x camada.

Fatores	RT	R1	R2	R3
	- - - - - - - - - - -	Comprimento (cm)	- - - - - - - - - - -	
Tráfego				
TC	1038,17 ns	29,42 ns	245,07 ns	763,49 ns
TAA	1159,03	27,23	255,90	875,70
TT	1044,60	29,22	249,18	765,99
Intensidade				
ST	1069,27 b	29,74 ns	251,80 ns	787,53 b
Tma1	1905,11 a	22,81	347,56	1534,39 a
Tma2	1030,13 b	31,12	243,89	754,95 b
Tme	929,60 b	25,89	222,62	680,91 b
Tme1	1155,98 ab	26,85	274,05	854,84 ab
Tme2	771,38 b	31,30	195,12	544,87 b
Camada				
0 - 0,05	2746,28 a	51,01 a	556,55 a	2138,15 a
0,05 - 0,10	1583,68 b	67,12 a	335,00 b	1181,29 b
0,10 - 0,15	668,70 c	22,96 b	159,55 c	486,11 c
0,15 - 0,20	483,43 c	13,37 bc	130,94 c	339,03 c
0,20 - 0,30	634,76 c	10,86 bc	186,51 c	437,27 c
0,30 - 0,40	482,48 c	4,40 c	139,28 c	338,73 c
Intensidade de Tráfego				
TC ST	1093,94 ab	30,27 ns	254,42 ns	809,07 ab
TC Tme	926,64 b	27,73	226,38	672,34 b
TAA Tma1	1905,11 a	22,81	347,56	1534,39 a
TAA Tma2	1030,13 ab	31,12	243,89	754,95 ab
TAA Tme	932,56 b	24,06	218,87	689,47 b
TAA Tme1	1155,98 ab	26,85	274,05	854,84 ab
TAA Tme2	771,38 b	31,30	195,12	544,87 b
TT ST	1044,60 ab	29,22	249,18	765,99 ab
Tráfego X Camada				
TC 0 - 0,05	2605,63 ns	57,50 ns	558,91 ns	1988,63 ns
TC 0,05 - 0,10	1534,02	72,46	339,13	1122,21
TC 0,10 - 0,15	679,85	21,23	152,44	506,12
TC 0,15 - 0,20	453,14	12,59	122,88	317,61
TC 0,20 - 0,30	518,09	9,83	159,04	349,11
TC 0,30 - 0,40	438,31	2,93	138,03	297,29
TAA 0 - 0,05	2843,15	49,87	535,94	2256,81
TAA 0,05 - 0,10	1743,58	57,69	352,70	1332,91
TAA 0,10 - 0,15	650,62	24,09	159,19	467,23
TAA 0,15 - 0,20	479,96	13,83	132,63	333,40
TAA 0,20 - 0,30	717,17	12,06	209,82	495,17
TAA 0,30 - 0,40	519,71	5,83	145,10	368,70
TT 0 - 0,05	2715,08	44,12	604,55	2065,79
TT 0,05 - 0,10	1258,39	82,68	284,54	890,84
TT 0,10 - 0,15	697,18	22,72	171,12	503,29
TT 0,15 - 0,20	537,54	13,39	138,79	385,24
TT 0,20 - 0,30	603,74	9,38	169,45	424,79
TT 0,30 - 0,40	455,68	3,02	126,60	325,97

Quanto ao fator intensidade de tráfego, o Tma1 resultou em maior comprimento radicular nas classes de diâmetro de raízes RT e R3, sendo superior em 2,5 e 2,8 vezes aos comprimentos radiculares observados em Tme2, o qual apresentou os menores comprimentos. Estes resultados indicam que a escarificação nas linhas de tráfego propiciam aumento do comprimento radicular da soja na primeira safra (tratamentos Tma1 e Tme1), mas na segunda safra (2 anos após) os mesmos efeitos benéficos da escarificação não são verificados, conforme indicado pelos tratamentos Tma2 e Tme2.

Em áreas sob SPD geralmente é observada a concentração do sistema radicular próximo a superfície do solo, até 10 cm de profundidade (CALONEGO; ROSOLEM, 2010; HANSEL *et al.*, 2017; LI *et al.*, 2017; VENZKE FILHO *et al.*, 2004). Fato que pode limitar a área vertical de solo explorada pelas raízes, deixando a cultura mais vulnerável à intempéries climáticas, como a estiagem, recorrente na região produtora de soja onde o presente experimento foi conduzido (DALLA NORA; AMADO, 2013). Estima-se que perdas de produtividade por estiagem na região podem chegar a 78 %, safra de 2003/04 (NEPOMUCENO *et al.*, 2008).

A média da precipitação do plantio até a coleta para avaliação das raízes foi de 6,5 mm dia^{-1}, no período restante até a colheita representou 5,1 mm dia^{-1}. Diferentemente da precipitação registrada na safra avaliada neste estudo, Calonego e Rosolem (2010) reportam que os efeitos prejudiciais da compactação do solo sobre a produtividade podem ser mais pronunciados em safras com baixa precipitação. Um comparativo entre cultivares de soja convencional e transgênica em condições de déficit hídrico, mostrou que a cultivares apresentaram resultado semelhante com relação a produtividade(CATUCHI *et al.*, 2011).

Em trabalho realizado por Hossne *et al*. (2015) foi observado que a umidade do solo exerceu maior efeito do que compactação do solo sobre o sistema radicular da cultura da soja. Podendo ser um indicativo que as avaliações, principalmente a RP, nos tratamentos do experimento poderiam mostrar diferenças maiores se a precipitação fosse menor que a registrada no período.

No presente estudo, 60% do sistema radicular ficou concentrado na superfície do solo (camadas 0 – 0,05 e 0,05 – 0,10 m). As classes RT, R2 e R3 na camada de 0 – 0,05 m concentraram, já R1 concentra 40% das raízes na camada 0,05 – 0,10m. Os dados de DS e Macro para camadas abaixo de 0,10 m (Tabela 4) indicam alterações na estrutura do solo que dificultam o desenvolvimento das raízes em camadas mais

profundas. A ação de sulcadores pode propiciar o maior desenvolvimento radicular em profundidade pela redução da DS e aumento da Macro como descrito por Li *et al.* (2017), não sendo observado diferenças estatísticas para efeito neste trabalho.

Outros trabalhos corroboram com esses resultados e apontam a concentração do sistema radicular da soja em SPD próximo a superfície, atribuída ao impedimento físico provocado pela presença de camadas subsuperficiais compactadas (LI *et al.*, 2017; NUNES *et al.*, 2014). Em trabalho conduzido por Hansel *et al.*(2017) visando promover o aprofundamento radicular de soja através de intervenções físicas (escarificações) e químicas (fósforo em profundidade), em SPD com problemas de compactação, foi observado maior desenvolvimento radicular da soja na camada de 0,20 – 0,25m em decorrência de da aplicação profunda de fósforo.

Em trabalho avaliando um período de 6 meses entre a escarificação e avaliação da densidade, foi relatado que ainda há efeito de redução da densidade do solo em Latossolo semelhando ao deste trabalho (CAMARA, KLEIN, 2005) . Enquanto para trabalho avaliado em Latossolo, o efeito positivos foram percebidos sobre a porosidade total e macroporosidade em até dois anos e meio (DRESCHER, *et al.*, 2011). Diferentemente dos resultados encontrados neste trabalho, em locais de condições favoráveis ao desenvolvimento radicular da soja pela escarificação, não foi percebido maior desenvolvimento radicular, tanto comprimento quanto volume em camadas mais profundas (CALONEGO; ROSOLEM, 2010; LI *et al.*, 2017).

O fator intensidade de tráfego apresentou diferença estatística para as classes RT e R3. Para a classe RT o tratamento TAA Tma1 apresentou comprimento superior em 82 % ao TT ST (tratamento referência). A classe R3 apresentou resultado semelhante a classe RT, o comprimento radicular de TAA Tma1 foi superior em 100 % ao TT ST. O efeito dos sulcadores é percebido nos tratamentos Tme1 e Tma1, o maior comprimento é mensurado na primeira safra. Para segunda safra, os tratamentos Tme2 e Tma2 apresentam os menores comprimentos, os quais são confirmados pelos resultados obtidos nas propriedades físicas do solo. Segundo Calonego, Rosolem (2010), a diminuição no comprimento não pode ser considerada uma redução, pois quando as raízes encontram solo compactado há intensa proliferação de raízes finas nos eixos laterais, modificando a distribuição espacial e podendo aumentar a superfície que explora o solo.

Esses resultados corroboram um estudo de compactação do solo em área de produção de cereais, o efeito da compactação causou redução ácidos graxos e

parâmetros de crescimento como massa e comprimento (SZATANIK-KLOC *et al.*, 2018). Outros fatores como a fertilidade, podem influenciar negativamente no desenvolvimento radicular. Trabalhos relatam que o fósforo quando é limitante, pode altera a arquitetura das raízes (HANSEL *et al.*, 2017; TAIZ, ZEIGER, 2017), ou até mesmo redução de 20 a 25% do comprimento e área do sistema radicular pela aplicação nitrogênio (MCCOY *et al.*, 2018).

Os resultados para a interação entre os fatores apresentados na Tabela 7, mostram que não houve interação significativa entre os tratamentos e classes avaliadas.

Tabela 7. Comprimento total das raízes (RT) de soja e comprimento radicular nas classificados nas classes de diâmetro R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm) para a interação dos fatores intensidade de tráfego x camada.

Fatores			RT	R1	R2	R3
			- - - - - - - - - - - Comprimento (cm) - - - - - - - - - - -			
Intensidade	de Tráfego	X Camada				
TC	ST	0 - 0,05	2934,79 ns	58,42 ns	621,96 ns	2253,80 ns
TC	ST	0,05 - 0,10	1594,67	73,58	348,71	1172,15
TC	ST	0,10 - 0,15	727,67	20,64	159,28	547,72
TC	ST	0,15 - 0,20	361,17	14,56	99,75	246,83
TC	ST	0,20 - 0,30	540,89	11,52	162,91	366,37
TC	ST	0,30 - 0,40	404,43	2,91	133,89	267,57
TC	Tme	0 - 0,05	1947,30	55,65	432,83	1458,29
TC	Tme	0,05 - 0,10	1412,72	70,21	319,96	1022,34
TC	Tme	0,10 - 0,15	584,19	22,42	138,75	422,92
TC	Tme	0,15 - 0,20	637,07	8,65	169,14	459,16
TC	Tme	0,20 - 0,30	472,49	6,46	151,32	314,58
TC	Tme	0,30 - 0,40	506,08	2,98	146,29	356,74
TAA	Tma1	0 - 0,05	4238,08	70,06	656,11	3511,08
TAA	Tma1	0,05 - 0,10	3291,59	28,13	497,47	2765,48
TAA	Tma1	0,10 - 0,15	1324,88	19,6	282,50	1022,57
TAA	Tma1	0,15 - 0,20	843,25	12,54	201,48	629,04
TAA	Tma1	0,20 - 0,30	1280,84	6,06	322,62	951,87
TAA	Tma1	0,30 - 0,40	452,01	0,48	125,16	326,32
TAA	Tma2	0 - 0,05	2775,78	67,88	624,5	2082,89
TAA	Tma2	0,05 - 0,10	1687,97	74,05	350,72	1262,89
TAA	Tma2	0,10 - 0,15	376,92	22,32	104,36	250,21
TAA	Tma2	0,15 - 0,20	296,47	11,66	88,85	195,96
TAA	Tma2	0,20 - 0,30	505,29	7,14	158,70	339,37
TAA	Tma2	0,30 - 0,40	538,34	3,68	136,18	398,40
TAA	Tme	0 - 0,05	2047,85	22,26	410,99	1614,27
TAA	Tme	0,05 - 0,10	1517,94	63,55	349,71	1104,41
TAA	Tme	0,10 - 0,15	683,40	20,96	150,97	511,36
TAA	Tme	0,15 - 0,20	443,84	15,32	129,43	299,03
TAA	Tme	0,20 - 0,30	527,64	11,65	171,57	344,30
TAA	Tme	0,30 - 0,40	374,68	10,61	100,53	263,46
TAA	Tme1	0 - 0,05	2922,55	49,08	562,25	2310,60
TAA	Tme1	0,05 - 0,10	1329,72	54,11	323,29	952,05
TAA	Tme1	0,10 - 0,15	423,82	19,44	124,19	280,07
TAA	Tme1	0,15 - 0,20	514,71	14,98	142,86	356,74
TAA	Tme1	0,20 - 0,30	884,61	15,09	265,80	603,60
TAA	Tme1	0,30 - 0,40	860,48	8,42	225,88	625,98
TAA	Tme2	0 - 0,05	2231,46	40,08	425,84	1765,2
TAA	Tme2	0,05 - 0,10	890,68	68,60	242,31	579,74
TAA	Tme2	0,10 - 0,15	444,10	38,13	133,91	271,97
TAA	Tme2	0,15 - 0,20	301,53	14,68	100,53	186,24
TAA	Tme2	0,20 - 0,30	387,49	20,35	130,42	236,70
TAA	Tme2	0,30 - 0,40	373,03	5,94	137,73	229,34
TT	ST	0 - 0,05	2715,08	44,12	604,55	2065,79
TT	ST	0,05 - 0,10	1258,39	82,68	284,54	890,84
TT	ST	0,10 - 0,15	697,18	22,72	171,12	503,29
TT	ST	0,15 - 0,20	537,54	13,39	138,79	385,24
TT	ST	0,20 - 0,30	603,74	9,38	169,45	424,79
TT	ST	0,30 - 0,40	455,68	3,02	126,60	325,97

A Figura 4 apresenta os resultados da RDA, a qual foi realizada para detectar a variável que melhor explica as raízes e a produtividade da soja. Para camada 0 – 0,05 m (Figura 4A) o primeiro eixo explica 11,65 % da variância, já o segundo 21,26 %. Pode-se observar que o eixo 1 demostra que as variáveis PT, Macro e Produtividade de grãos (Prod) apresentam alta correlação positiva com raízes mais espessas (R1) e fracamente com raízes médias (R2) e finas (R3), raízes totais (RT) e infiltração de água (Inf.). Esses apresentam correlação negativa com as variáveis do lado direito do diagrama Micro, RP1 e RP2 e DS.

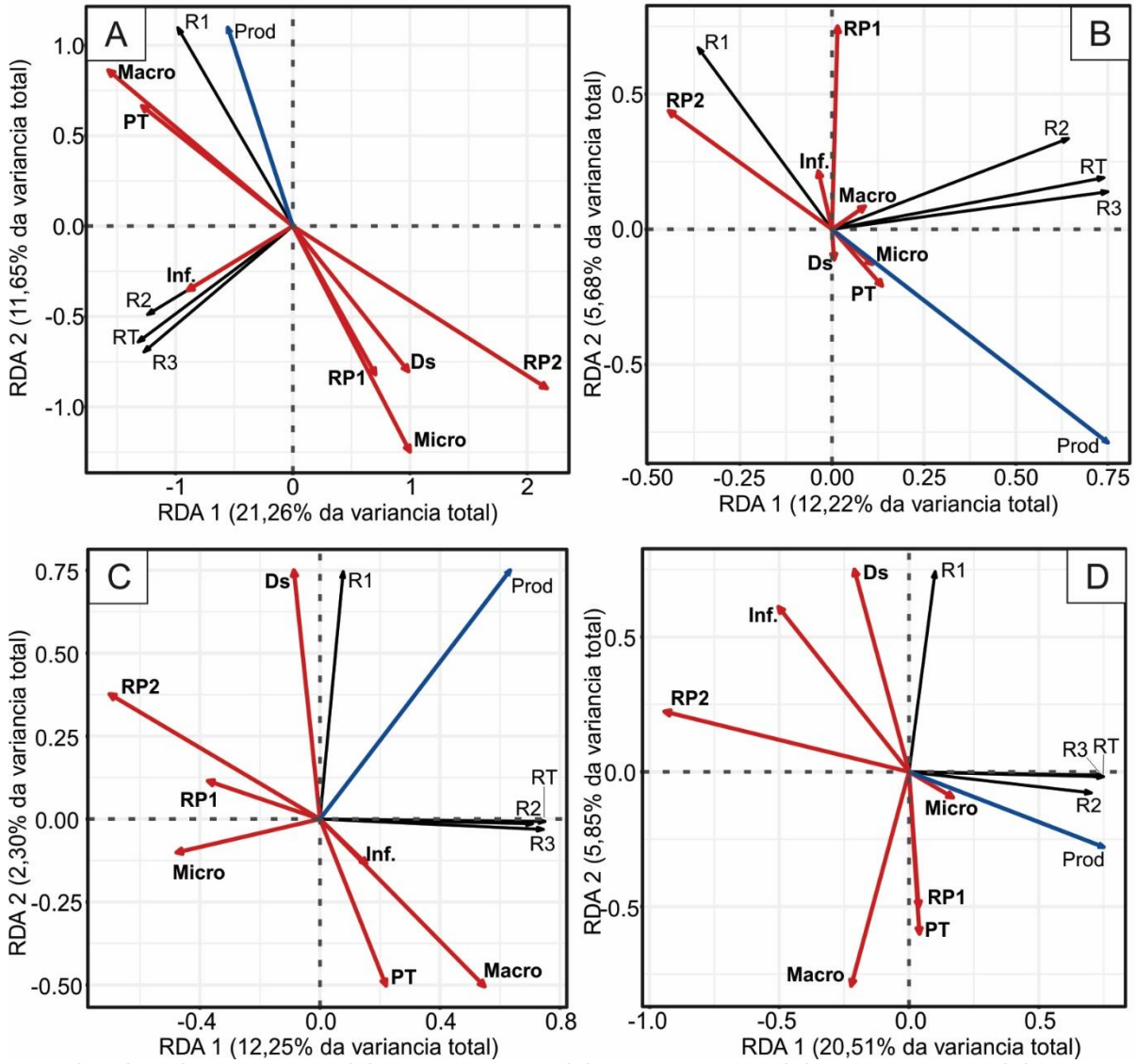
A Figura 4B apresenta os dados da camada 0,05 – 0,10, o primeiro eixo explica 5,86% da variância, já o segundo 12,22 %. Destaca-se o vetor de produtividade oposto aos vetores de RP2 e R1, corroborando com trabalhos que reportam que a melhoria da estrutura do solo beneficia a produtividade da soja (CALONEGO *et al.*, 2017). As variáveis de Ds, Macro, Micro, PT e infiltração acumulada apresentam vetores pequenos que representam baixa influência sobre as demais avaliações. Para camada de 0,10 – 0,15 m (Figura 4C), é possível inferir a dependência da infiltração pela macroporosidade e sua relação inversa com a RP2. Enquanto que a DS e PT apresentam vetores opostos, como percebido nos dados já discutidos da Tabela 5. O vetor da produtividade apresenta baixa dependência com as observações de propriedades do solo realizadas. No entanto, R1 apresenta correlação mais próxima como ocorrido na Figura 4A.

A Figura 4D que apresenta os resultados da RDA para camada de 0,15 – 0,20 e 20,51 % da variância é explicado pelo eixo 1, o vetor das raízes R1 apresenta correlação negativas com os dados de Macro, PT e RP1. Já os vetores de produtividade e Micro apresentam baixa correlação positiva, já com os vetores de inf. e RP2 há uma dependência negativa entre essas observações. Ao lado direto do diagrama as classes de raízes RT, R2 e R3 e produtividade apresentaram proximidade dos vetores, mostrando que nessa profundidade ocorre diferenciação das demais camadas para esses resultados.

Para as quatro camadas, os vetores demonstram forte correlação entre as observações das classes de comprimento radicular R2, R3 e RT, já R1 apresenta vetor com ângulo próximo a 90° o que demonstra a baixa correlação dessa com as demais classes de diâmetro radicular avaliadas. Podemos destacar que os vetores de produtividade e a classe de R1 nas camadas 0 – 0,05, e 0,10 – 0,15 m, já as classes RT R2 e R3 para as camadas 0,05 – 0,10 e 0,15 – 0,20 m apresentam correlações

positivas e esses resultados são claramente dependentes do manejo que o solo foi submetido. Não é possível destacar a variável de solo que melhor explica a produtividade de soja, pois na medida que são avaliadas camadas diferentes as respostas dos comportamentos da produtividade e as variáveis do solo são modificadas. Assim se destaca os resultados da camada 0 – 0,05 m, com maior explicação 21,26 e 11,65 para RDA1 e 2, para a alta correlação positiva entre a produtividade, R1, Macro e PT.

Figura 4. Analise de redundância (RDA) realizada para os dados de resistência a penetração RP (resistência a penetração), DS (densidade do solo), Macro (macroporosidade), Micro (microporosidade) e PT (porosidade total), comprimento radicular, e produtividade da cultura da soja para as camadas 0 – 0,05, 0,05 – 0,10, 0,10 – 0,15, 0,15 – 0,20 m.



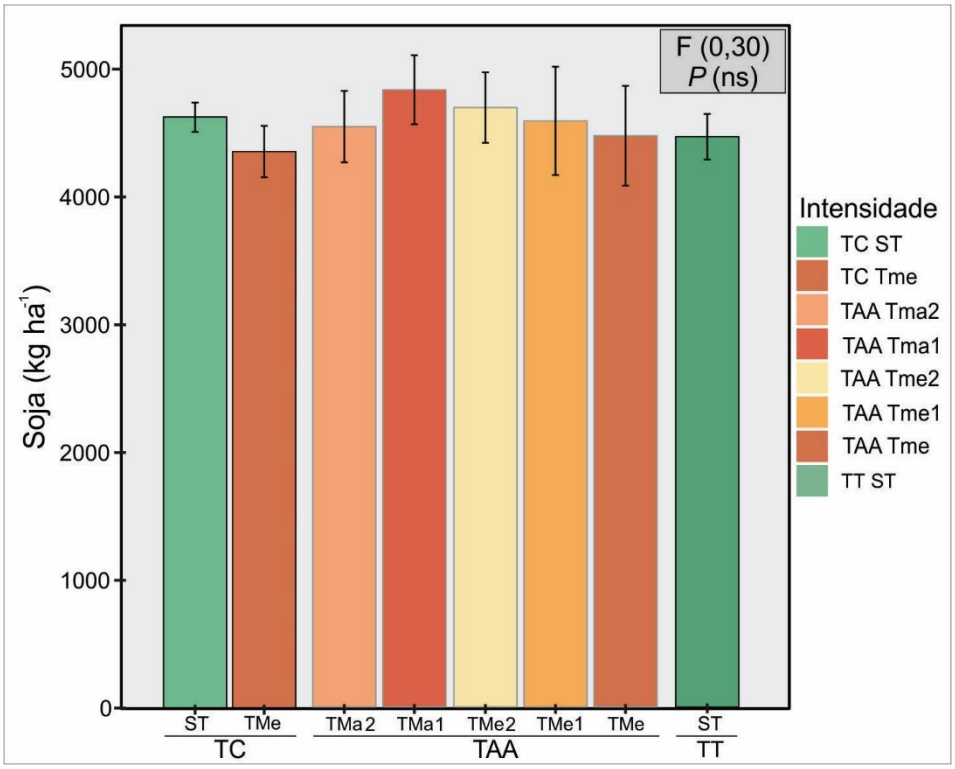
Camadas de solo: 0 - 0,05 m (A), 0,05 – 0,10 m (B), 0,10 – 0,15 m (C), 0,15 – 0,20 m (D). Vetores: Produtividade da soja (prod).

7.5.3 Avaliação da produtividade

Os tratamentos não afetaram a produtividade da cultura da soja (Figura 5). Para Drescher et al.(2012) o efeito residual da intervenção mecânica sob SPD, e para Li et al. (2017) o arado de aivecas não alterou significativamente a produtividade da cultura da soja quando comparado ao SPD. Observações de Girardello, *et al.* (2017) corroboram com as anteriores e não detectaram diferença na produtividade da soja em SPD, sob tráfego controlado com diferentes intensidades, no estado do Paraná. Para Sivarajan *et al.* (2018) a compactação nos rastros dos implementos não alterou altura de plantas e produtividade de soja e milho em solos que permanecem parte do ano congelados. Enquanto Seki *et al.*(2015) reportam que a cultura do milho não apresentou resposta quando o solo foi subsolado, escarificado ou utilizada sulcadores no plantio em um Nitossolo de textura argilosa sob PD.

Para Calonego *et al.* (2017) o efeito da escarificação resulta em um efeito significativo imediato na melhoria da estrutura do solo e melhora na produtividade da soja, sendo esse efeitos percebidos no primeiro ano. Trabalhos com outras culturas apresentam resultados significativos para solos com moderada compactação, como relatado por Moraes et al. (2018) para cultura do milho, e para as culturas de trigo e cevada relatado por Arvidsson and Håkansson (2014).

Figura 5. Produtividade de soja safra 2017/18 para tipo de tráfegos e interação tráfego intensidade.



Tratamentos: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). Intensidades de tráfego: sem tráfego (ST), tráfego máximo (Tma), tráfego máximo há um ano (Tma1), tráfego máximo há dois anos (Tma2), tráfego médio (Tme), tráfego médio há um ano (Tme1) e tráfego médio há dois anos (Tme2).

7.6 CONCLUSÕES

As propriedades físicas do solo foram influenciadas pela ação dos tratamentos nas camadas 0 – 0,05 e 0,05 – 0,10m. O tratamento tráfego controlado sem tráfego (TC ST) apresentou aumento de macroporos em 158% e redução da densidade do solo em 18,8% na camada 0 - 0,05 m em comparação ao tráfego tradicional. Estas alterações não influenciaram o comprimento do sistema radicular da cultura da soja, independente das classes de diâmetro das raízes.

As linhas antigas de tráfego alternado anual apresentaram melhoras nas características físicas do solo, no entanto, as mesmas se restringem à primeira safra após o deslocamento. Através da análise de redundância foi possível estabelecer as variáveis que melhor explicam em cada camada do solo os resultados para comprimento radicular e produtividade da soja. As maiores correlações positivas foram obtidas entre os vetores de produtividade, R1, Macro e PT para a camada 0 – 0,05m, onde a RDA explica 21,26% na RDA 1 e 11,65 na RDA 2.

O tráfego controlado em geral, após três anos de adoção, apresentou melhorias nas propriedades físicas do solo e quanto as avaliações de raízes e produtividade não houve diferenças significativas. O tráfego controlado adotado a longo prazo poderá trazer resultados mais expressivos em áreas predispostas à compactação.

7.7 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil**.** **Meteorologische Zeitschrift** v. 22, n. 6, p.711–728, 2013.

ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, Inge. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments. **Soil and Tillage Research** v.138, p.56–63, 2014.

ASAE, Engineers american society of agricultural. Soil cone penetrometer. SAE **Agricultural Engineers Yearbook** n.313:1, p.368–369, 1976.

BARNI, N.A.; MATZENAUER, R. Ampliação do calendário de semeadura da soja no rio grande do sul pelo uso de cultivares adaptados aos distintos ambientes. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha.** v.6, n.2, p.189–203, 2000.

BÖHM, W. Methods of Studying Root Systems. **Ecological Studies,** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p.188, 1979.

BORRELLI, Pasquale et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. Nature Communications , 2017.2041-1723.

BOTTA, G. F. et al. Compactión produced by combine harvest traffic: Effect on soil and soybean (Glycine max l.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. European Journal of Agronomy v. 74, p. 155–163 , 2016.

BOTTA, G. F. et al. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (Glycine max L.) yields in Argentinean pampas. Soil and Tillage Research v. 110, n. 1, p. 167–174 , 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2010.07.001>.

CALONEGO, Juliano C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. European Journal of Agronomy v. 85, p. 31–37 , abr. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>.

CALONEGO, Juliano C.; ROSOLEM, Ciro A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. European Journal of Agronomy v. 33, n. 3, p. 242–249 , 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2010.06.002>.1161-0301.

CAMARA, Rodrigo Kurylo; KLEIN, Vilson Antonio. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. Revista Brasileira de Ciencia do Solo v. 29, n. 5, p. 789–796 , 2005.

CATUCHI, Tiago Aranda et al. Tolerance to water deficiency between two soybean cultivars: transgenic versus conventional. Ciência Rural v. 41, n. 3, p. 373–378 , 2011.

Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782011000300002&lng=en&tlng=en>.

CHAMEN, W. C. T. Controlled traffic farming - From worldwide research to adoption in Europe and its future prospects. **Acta Technologica Agriculturae**. v.18, n.3, p.64–73, 2015.

CHAMEN, W. C. T. The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types. PhD Thesis, Cranfield University p.305, 2011.

CLARK, A. No TitleManaging cover crops profitably. Sustainable Agriculture Research and Education (SARE) program. 3. ed. [S.l.]: United Book Press, 2012. p. 81–86. 978-1-888626-12-4.

COSTA, F. S. et al. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. Revista Brasileira de Ciência do Solo v. 27, n. 3, p. 527–535 , jun. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000300014&lng=pt&tlng=pt>.0100-0683.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J.C. Improvement in chemical attributes of Oxisol subsoil and crop yields under no-till. Agronomy Journal , 2013.

DRESCHER, M.S. et al. Fertilizer shanks to promote soil decompaction in the seeding operation. Ciencia Rural v. 47, n. 3, p. 1–8 , 2017.

DRESCHER, Marta Sandra et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. Pesquisa Agropecuaria Brasileira v. 51, n. 2, p. 159–168 , 2016.

DRESCHER, Marta Sandra et al. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciencia do Solo 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** v.36, n.6, p.1836–1844, 2012.

ELTZ, F. L. F.; MEHEL, H. U.; REICHERT, J. M. Perdas de solo e água em entressulcos em um argissolo vermelho-amarelo submetido a quatro padrões de chuva. Revista Brasileira de Ciência do Solo v. 25, n. mm, p. 485–493 , 2001.

EMBRAPA. Manual de métodos de analise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2017. 573 p. .978-85-7035-771-7.

EMBRAPA. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.], 2002. p. 174.

EMBRAPA, Clima Temperado. Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. p.334, 2012.

EMBRAPA, Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2º ed. Rio de Janeiro, RJ, p. 230, 2011a.

EMBRAPA, Solos. O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Online, 2011b. 67 p. 1 v. .1517-2627.

FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION). Global agriculture towards 2050. High Level Expert Forum-How to feed the world 2050 , 2009.1529-9430.

GIRARDELLO, V. C. et al. Benefícios do tráfego controlado de máquinas no Rio Grande do Sul. In: SANTI, A.L. et al. (Orgs.). Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul. 1.ed. Santa Maria, Brasil. p.189–212. 2016.

GIRARDELLO, V.C. et al. Soil penetration resistance, Efficiency of mechanical chisel plowing and soybean grain yield in a clayey oxisol under long-term no-till. Revista Brasileira de Ciencia do Solo v. 38, n. 4 , 2014.

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** v.38, n.4, p.1234–1244, 2014.

GIRARDELLO, Vitor Cauduro et al. Alterações nos atributos físicos de um latossolo vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. Revista Brasileira de Ciência do Solo v. 35, n. 6, p. 2115–2126 , dez. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000600026&lng=pt&nrm=iso&tlng=en>.

GIRARDELLO, V. C. et al. Resistência do solo a penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Scientia Agraria.** v.18, n.2, p.86, 2017.

GUENETTE, K. G.; HERNANDEZ, G. R.. Tracking the influence of controlled traffic regimes on field scale soil variability and geospatial modeling techniques. **Geoderma** v.328, p.66–78, 2018.

GUERRA, Antônio José Teixeira et al. Soil erosion and conservation in Brazil. Anuario do Instituto de Geociencias , 2014.9780511735394.

HANSEL, Fernando D. et al. Phosphorus fertilizer placement and tillage affect soybean root growth and drought tolerance. Agronomy Journal v. 109, n. 6, p. 2936–2944 , 2017.

HOSSNE, G. A. et al. Soil irrigation frequencies, compaction, air porosity and shear stress effects on soybean root development. Acta Universitaria v. 25, n. 1, p. 22–30 , mar. 2015. Disponível em: <http://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/676>.9441117803.

KUZNETSOVA, Alexandra; BROCKHOFF, Per B; CHRISTENSEN, Rune H B. {lmerTest} Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. Journal of Statistical Software v. 82, n. 13, p. 1–26 , 2017.

LANZANOVA, M.et al. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** V.31, n.5, p.1131–1140, 2007.

LAWLEY, Yvonne E.; WEIL, Ray R.; TEASDALE, John R. Forage radish cover crop suppresses winter annual weeds in fall and before corn planting. Agronomy Journal v. 103, n. 1, p. 137–144 , 2011.0002-1962.

LI, H. et al. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil and Tillage Research,** v.165, p.258–267, 2017.

MCCOY, Justin M. et al. Nitrogen Fertilization of Soybean Affects Root Growth and Nodulation on Two Soil Types in Mississippi. Communications in Soil Science and Plant Analysis v. 49, n. 2, p. 181–187 , 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421649>.

MORAES, M. T.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.53, n.4, p.464–477, 2018.

NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B. Perdas por seca - Árvore do conhecimento - Soja. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/soja/arvore/CONT000fzr67crj02wx5ok0cpoo6awmgu8s1.html>. Acesso em: 1 set. 2018.
NUNES, Márcio Renato et al. Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. Revista Brasileira de Ciencia do Solo v. 38, n. 2, p. 627–638 , 2014.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing . Vienna, Austria. 2018.

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

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Brasília-DF. Embrapa, p.353, 2013.

SEKI, André Satoshi et al. Effects of soil decompaction techniques in an area under a system of direct seeding. Revista Ciência Agronômica v. 46, n. 3, p. 460–468 , 2015. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/1806-6690.20150027>.

SATO, M. K. et al. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics**. v. 29, n. 4, p. 441–447, 2015.

SIVARAJAN, S. et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**. v.175, p.234-243. 2018.

SUZUKI, Luis Eduardo Akiyoshi Sanches et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Ciência do Solo v. 32, n. 3, p. 963–973 , jun. 2008. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832008000300006&lng=pt&tlng=pt>.
SZATANIK-KLOC, Alicja et al. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. Soil and Tillage Research v. 175, n. September 2017, p. 226–233 , 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.08.016>.
TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. 6a ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p. .978-85-8271-366-2.

TREIN, C. R.; MACHADO, A. P.; LEVIEN, R. Compactação do solo por rodados, podemos evitá-la. **Revista Plantio Direto.** v.114, p. 23–34, 2009.

UNITED NATIONS; AFFAIRS, Department of Economic and social. World Population Prospects: The 2012 Revision. Highlights and Advance Tables. Population and development review , 2013.ESA/P/WP.228.
USDA. Soil Texture Calculator. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/soils/?cid=nrcs142p2_054167>. Acesso em: 6 jun. 2018.
VALADÃO, Franciele Caroline de Assis et al. ADUBAÇÃO FOSFATADA E COMPACTAÇÃO DO SOLO: SISTEMA RADICULAR DA SOJA E DO MILHO E ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO. Revista Brasileira de Ciência do Solo v. 39, n. 1, p. 243–255 , fev. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000100243&lng=pt&tlng=pt>.

VENABLES, W N; RIPLEY, B D. Modern Applied Statistics with S 4ª ed. New York: Springer, 2002.

VENZKE FILHO, Solismar de Paiva et al. Root systems and soil microbial biomass under no-tillage system. Scientia Agricola v. 61, n. 5, p. 529–537 , out. 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162004000500011&lng=en&tlng=en>.0103901620.
WICKHAM, Hadley. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. [S.l.]: Springer-Verlag New York, 2016. Disponível em: <http://ggplot2.org>. .978-3-319-24277-4.
WINGEYER, Ana B. et al. Soil quality impacts of current South American agricultural practices .Sustainability (Switzerland). [S.l: s.n.]. , 2015

8. ARTIGO 3 – AVALIAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS, PRODUTIVIDADE DE AVEIA E SOJA, DESENVOLVIMENTO RADICULAR SUBMETIDOS A TRÊS TIPOS DE TRÁFEGO

8.1 RESUMO

O manejo do solo e culturas carece de maiores cuidados devido as previsões do crescimento populacional para as próximas décadas, e a degradação dos solos do planeta. Para isso serão necessárias medidas que visem o aumento da produtividade das culturas, e ao mesmo tempo conservem o meio ambiente. No Brasil, o sistema plantio direto (SPD) é muito difundido, e considerado um sistema conservacionista. A agricultura deverá somar novas tecnologias ao SPD, para assim alcançar as necessidades de conservação dos solos e produção de alimentos dos próximos anos. Com isso o objetivo desse trabalho foi avaliar três sistemas de tráfego sobre SPD e suas alterações sobre: as propriedades físicas, infiltração de água, desenvolvimento radicular e produtividade da soja, massa seca da aveia, e retorno econômico dos investimentos para implementação do novo tipo de tráfego. O estudo foi conduzido em uma área comercial de 89ha no município de Carazinho, RS, manejada sob SPD por cerca de 20 anos, em um Latossolo Vermelho Distrófico Típico. Os tratamentos foram constituídos pelos tipos de tráfego tradicional (TT), tráfego controlado (TC) e tráfego alternado anual (TAA). Foram avaliados parâmetros físicos de densidade (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (PT) do solo em 4 épocas, taxa de infiltração de água em 2 épocas, 3 safras de soja e 1 de aveia entre 2015 e 2018 e o comprimento do sistema radicular da soja. Houve redução da DS de 15 e 13 % e aumento da Macro de 121 e 118 % para TC e TAA, respectivamente, quando comparados ao TT. A infiltração de água acumulada foi incrementada em 2,9 e 2,5 vezes para TC e TAA. Constataram-se incrementos produtivos com a adoção de TC (26 e 26 %), e TAA (43 e 27 %) para massa da aveia e soja, na safra 2016/17; enquanto o incremento médio para cultura da soja pela adoção, durante as três safras, foi de 10 % para TC e 6 % para TAA. Foi estimado que o retorno do investimento se dará em aproximadamente 6 safras. Já a rentabilidade pela adoção do TC foi de US$136,05 ha ano^{-1}. Conclui-se que a adoção do tráfego controlado em 3 safras apresentou melhorias significativas, principalmente em relação à infiltração de água, produtividade e rentabilidade. No entanto, para resultados mais conclusivos, recomenda-se que o estudo do TAA seja conduzido por um período mais longo.

Palavras-chave: Tráfego controlado. Tráfego alternado anual. Plantio direto

8.2 ABSTRACT

EVALUATION OF PHYSICAL ATTRIBUTES, YIELD OF OATS AND SOYBEAN, ROOT DEVELOPMENT SUBJECTED TO THREE TYPES OF TRAFFIC

Soil and crop management require greater care due to the forecasts of population growth in the coming decades, and the degradation of the soils across the globe. Measures need to be taken in order to meet the increasing crop demand whilst also preserving the environment. The no-tillage system (NT) is widely used in Brazil and is

considered a method of conservation. New technologies should be developed to contribute to the NT system, to achieve the soil conservation goals and food production demands in the coming years. Thus, the objective of this work was to evaluate three traffic systems on the NT system and its effects on physical properties, water infiltration, root development, soybean yield, and aboveground dry mass production (ADMP) of oat, in addition to the economic return of the investments for implementing the new types of traffic. The study was conducted in an 89-ha field (on-farm research), in the municipality of Carazinho, RS, managed under NT system for the last 20 years. The levels of traffic were categorized into three types: traditional traffic (TT), controlled traffic (CTF), and annual alternate traffic (AAT). Evaluations were performed four times for soil bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity; seven times for penetration resistance; two times for soil water infiltration rate. Soybean seed yield during three growing seasons, from 2015 to 2018, oat ADMP in 2017, and the length of the root system was evaluated. There was a reduction in soil bulk density of 15% and 13% and an increase in the macroporosity of 121% and 118% for CTF and AAT macroporosity, respectively, in comparison to TT. Accumulated water infiltration was increased by 2.9 and 2.5 times for CTF and AAT, respectively. A rise in productivity was observed, 26%, 26% and 43%, 27% for CTF, AAT and oat ADMP and soybean yield, respectively, in the 2016-2017 crop, while the average increment for the soybean crop during the three harvests was 10% for CTF and 6% for AAT. A return on investment was estimated to be in approximately 6 harvests, and the profitability by adopting the CTF was US$136.05 ha year^{-1}. The adoption of controlled traffic during the experimental period showed significant improvements, mainly on water infiltration, productivity and profitability, AAT will require further investigation over a longer period.

Keywords: Controlled traffic farming. Annual alternate traffic. No-tillage system.

8.3 INTRODUÇÃO

Atualmente a população mundial é de 7,6 bilhões de pessoas, as projeções são que em 2030 atinja 8,6 bilhões, e no anos de 2050 9,8 bilhões de pessoas (ONU, 2017). O relatório da FAO *et al.* (2015) aponta problemas de erosão, salinização, compactação, acidificação entre outros problemas chegam a 33 %, ou seja 1/3 do solo do planeta está degradado. Ações que visam reduzir as emissões de CO2, e a erosão do solo e possibilitem o incremento de produtividade das culturas são desejáveis para manter a saúde do planeta, principalmente mantendo as condições de produção de alimentos seguras para as próximas gerações.

Estima-se que o Brasil perca na cifra de R$1,3 bilhão ao ano em virtude dos processos erosivos em lavouras anuais (DECHEN *et al.*, 2015), com isso a intervenção com sistemas conservacionistas como o sistema plantio direto (SPD) se torna obrigatório. Para Silva e de Maria (2011) o SPD é considerado um sistema conservacionista que protege o solo contra erosão. Já Amado *et al.* (2001) destacam

ser um sistema ambientalmente correto que contribui com a fixação de carbono no solo.

Para melhorar a qualidade do SPD, recomenda-se a adoção de ferramentas, tais como como as do tráfego controlado (TC), que busca gerenciar as máquinas para que se desloquem em linhas permanentes, com trânsito na menor área possível (CHAMEN, 2015). Para realizar as atividades em uma safra (dessecação, semeadura, pulverizações e colheita), o tráfego tradicional (TT) sobre SPD trafega em 55,7 % da superfície da área, já quando adotado o TC a área trafegada se reduz para 18,4 % (KROULÍK *et al.*, 2009).

Isbister *et al.* (2013) destacam benefícios ambientas como a maior infiltração e com isso a redução da possibilidade de erosão hídrica, identificação em maior quantidade de macrofauna (minhocas, formigas e cupins) e redução de emissão de CO2 pela economia de combustível dos implementos. A redução da erosão do solo é diretamente ligada ao escoamento superficial e capacidade do solo em absorver as precipitações, com isso o aumento das áreas sem tráfego de máquinas propicia o aumento das taxas de infiltração de água no solo (ALBA *et al.*, 2011; ANTILLE; IMHOFF; *et al.*, 2015; CHAMEN, 2011; GIRARDELLO *et al.*, 2016). Esse incremento ocorre principalmente em virtude do controle da compactação que fica restrita às áreas específicas para o deslocamento (TULLBERG *et al.*, 2007), protegendo o solo, nos locais livres, evitando a ocorrência de mudanças na estrutura física (CHAMEN, 2015).

A adoção do tráfego controlado é viável técnica e economicamente, além de ambientalmente melhorar a qualidade do solo e a eficiência no uso de insumos e a ainda melhorar a produtividade (ANTILLE *et al.*, 2015). No entanto, as respostas para melhora no solo pela adoção do TC não se dão em curto prazo, como destacam Reichert *et al.* (2016). Elas podem demorar 14 anos para alcançar o chamado estágio de estabilização.

Neste cenário, este estudo foi realizado para avaliar o efeito da implantação de diferentes sistemas de tráfego de máquinas sobre as características físicas de um Latossolo Vermelho distrófico típico, e a resposta sobre a produtividade de grãos de soja, massa seca da aveia, bem como o retorno do investimento para adoção do TC.

8.4 MATERIAL E MÉTODOS

O local de condução, tratamentos e atividades realizadas nesse trabalho foram descritas nos artigos 1 e 2 da tese, assim optou-se por não repetir as descrições. Sendo apresentado no material e métodos deste trabalho as descrições dos itens de relativização dos dados, análise econômica nos itens abaixo.

8.4.1 Relativização dos dados

Para determinação da porcentagem de área de cada tipo de tráfego (TC, TAA, TT), foram utilizadas as áreas correspondentes de cada intensidade dentro de cada tráfego (Tabela 1). Assim, foi possível determinar, a partir da área real de cada manejo de tráfego, os resultados em área total, podendo compará-los de maneira adequada. Para cada tipo de tráfego foi utilizado uma equação para determinação dos resultados.

Equação 1. Tráfego controlado (TC)

$$TC = (xST\,.\,aST) + (xTmA\,.\,aTma) + (xTme\,.\,aTme)$$

Equação 2. Tráfego alternado anual (TAA)

$$TAA = (x\,.\,aST) + (xTma\,.\,aTma) + (xTma1\,.\,aTma1) + (xTma2\,.\,aTma2) + (xTme\,.\,aTme) + (xTme1\,.\,aTme1) + (xTme2\,.\,aTme2)$$

Equação 3. Tráfego tradicional (TT)

$$TT = (xST\,.\,aST) + (xTmA\,.\,aTma)$$

Onde:
x = dado de avaliação de propriedade física do solo, ou planta ou produtividade das diferentes intensidades avaliadas.
a = porcentagem de área de cada intensidade de tráfego.

Tabela 1. Porcentagem das intensidades de tráfego determinada pela largura do maior pneu utilizado durante as intervenções de semeaduras, pulverizações e colheitas.

Tráfego	Intensidade	2015/16	2016**	2016/17	2017**	2017/18
		- - - - - - - -	- - - - - - - -	% área	- - - - - - - -	- - - - - - - -
TC	ST	85,5	85,5	85,5	85,5	85,5
	Tma	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
	Tme	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
TAA	ST	85,5	71,0	71,0	56,4	56,4
	Tma2	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3
	Tma1	-	5,3	5,3	5,3	5,3
	Tma	-	-	-	5,3	5,3
	Tme2	9,2	9,2	9,2	9,2	9,2
	Tme1	-	9,2	9,2	9,2	9,2
	Tme	-	-	-	9,2	9,2
TT*	ST	44,3	39,0	33,6	28,3	23,0
	Tma	5,3	5,3	5,3	5,3	5,3

* A partir do trabalho de Kroulík *et al.* (2009) para os dados PD em uma safra, 44,30% da área sem tráfego foram descontados a cada safra a porcentagem que era trafegada pelo pulverizador. Com isso foram estabelecias as porcentagens para as safras de TT ST, adaptando para as condições em que o trabalho foi conduzido Carazinho – RS.
** As semeaduras da aveia ocorrem nas mesmas linhas de tráfego das culturas antecessoras, deslocado as linhas 2 e 1 m (2016 e 2017 respectivamente), partir da primeira passada do pulverizador na cultura da aveia.

Segundo Kroulík *et al.* (2009) 55,7% da área recebe o contato dos pneus sobre o solo em apenas uma safra quando é utilizado o tráfego tradicional (TT) sob plantio direto (PD). Com isso os dados da Tabela 2 para TT são apenas uma referência do amassamento que a cultura recebe durante o ciclo, apenas para as pulverizações.

Neste trabalho foi utilizado equipamentos de 9 e 27 m, podendo ser aumentada a área ST pela utilização de equipamentos com maior largura de trabalho, como exemplo 10 e 30 m ou 12 e 36 m. Para Tullberg (2010) o tráfego controlado, quando bem projetado, destina até 15 % da área para as linhas de tráfego.

8.4.2 Análise econômica

Para análise econômica foram considerados os investimentos necessários para adaptação de máquinas e implementos como: ajuste de bitola, aumento da barra de pulverização, aumento do cano de descarga dos grãos, adaptação no graneleiro de transporte de grãos. Aquisição de receptores GNSS de precisão centimétrica, compra de sinal de GNSS corrigido por satélite estacionário e o custo da mão de obra para

elaboração do projeto das linhas de tráfego. Os valores foram convertidos para cotação do dólar (US$1,00 = R$ 3,7569) do dia 2 de agosto (UOL, 2018).

A receita bruta foi estimada pela soma das médias produtivas das safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18, e a cotação da saca (60kg) de soja de R$73,50 para o dia 02 de agosto no município de Carazinho – RS (AGROLINK, 2018). A partir da diferença dos tratamentos com tráfego controlado (TC e TAA) e o tradicional (TT) calculou-se a rentabilidade.

O retorno econômico (payback simples) foi determinado pela diferença dos valores investidos e a rentabilidade média anual para as três safras do estudo. Os resultados são expressos em anos.

8.4.3 Estatística

A avaliação dos dados foi realizada no software livre R (R CORE TEAM, 2018), através dos pacotes lm4 (KUZNETSOVA *et al.*, 2017). Primeiramente, foi verificada a normalidade e distribuição dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk. Quando os dados não foram normais utilizou-se a função Box-Cox (VENABLES; RIPLEY, 2002). Após foi realizada a comparação das médias com base na análise de variância (ANOVA), o teste de Tukey foi aplicado a nível de significância $p<0,05$ para determinação das diferenças significativas.

8.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da ANOVA para o efeito dos fatores tipo de tráfego para os fatores de tráfego, camada, e a interação tráfego x camada para as variáveis de solo (RP, DS, Macro, Micro, PT e infiltração) e as variáveis de planta (raízes e produtividade).

Tabela 2. Resumo ANOVA – Sistema de tráfego. Valores de Fisher (F) e níveis de significância (*P*) para intensidade de tráfego, camada e interação entre tráfego x camada para resistência a penetração mecânica do solo, anéis volumétricos, e produtividades.

Avaliação			Tráfego		Camada		Trafego x Camada	
			F	*P*	F	*P*	F	*P*
Resistência a Penetração		14	0,156	ns	69,306	***	0,041	ns
		16	1,040	ns	68,886	***	0,482	ns
		20	0,053	ns	73,252	***	0,076	ns
		23	0,042	ns	300,227	***	1,686	ns
		24	0,556	ns	153,982	***	0,646	ns
		26	1,342	ns	146,191	***	2,212	*
		7	2,567	ns	281,557	***	2,140	ns
Anéis Volumétricos	3	DS	1,513	ns	2,419	ns	0,288	ns
		Micro	0,237	ns	1,512	ns	0,619	ns
		Macro	1,246	ns	2,280	ns	0,485	ns
		PT	2,960	ns	19,002	***	1,888	ns
	14	DS	1,025	ns	126,651	***	2,375	ns
		Micro	2,494	ns	2,775	*	0,342	ns
		Macro	5,424	**	42,808	***	1,115	ns
		PT	3,056	ns	60,827	***	0,721	ns
	28	DS	8,598	***	55,549	***	4,44	***
		Micro	0,094	ns	27,128	***	2,218	*
		Macro	11,742	***	73,145	***	8,661	***
		PT	12,464	***	59,652	***	4,135	***
Infiltração de água		Instantânea	11,795	**	300,166	***	9,188	***
		Acumulado	11,187	**	110,818	***	10,235	***
Raízes		R1 (<0,2mm)	0,058	ns	37,705	***	0,542	ns
		R2 (0,2 - 0,8mm)	1,062	ns	52,184	***	0,963	ns
		R3 (>0,8mm)	0,013	ns	43,802	***	0,458	ns
		RT (Total)	0,109	ns	44,533	***	0,616	ns
Produtividade		Soja (15/16)	0,012	ns	-	-	-	-
		Soja (16/17)	8,957	**	-	-	-	-
		Aveia (17)	8,710	**	-	-	-	-
		Soja (17/18)	1,524	ns	-	-	-	-
		Soja (3 safras)	3,665	*	-	-	-	-

Níveis de significância: *** < 0,001; ** < 0,01; * < 0,05; ns > 0,05.

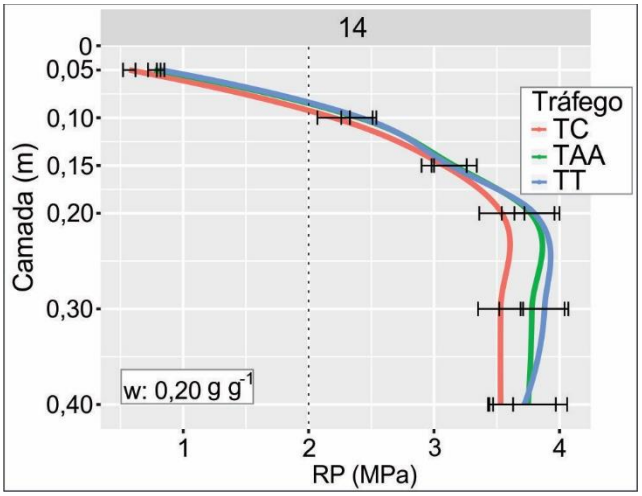
8.5.1 Resistência mecânica do solo a penetração (RP)

As avaliações foram realizadas a partir da cultura da soja, safra 2016/17, no estágio de florescimento e colheita (14 e 16 meses), no desenvolvimento e final de ciclo da aveia 2017 (20 e 23 meses). Para safra de soja 2017/18 as avaliações foram realizadas no plantio, florescimento e colheita aos 24, 26 e 28 meses. Os diferentes estágios de avaliação possibilitam mensurar a variabilidade dos tratamentos e qual seu efeito sobre a interação dos fatores tráfego X camada. Nas Figura 1 e 2, foi

adicionado a referência de RP (2,0 MPa). Segundo Arshad *et al.* (1996) e Reynolds *et al.* (2002) registros maiores que esse valor dificultam o desenvolvimento radicular fazendo com que as plantas necessitem gastos extras de energia para romper as camadas compactadas.

O menor teor de umidade (w) foi verificado na avaliação 1 (Figura 1), onde foram registradas as maiores médias de RP entre as avaliações (2,97 MPa). Esses resultados corroboram com o trabalho conduzido por Silveira *et al.*, (2010), onde reportam a elevada correlação negativa entre a RP e a umidade do solo. Girardello *et al.* (2014b) relatam que o desenvolvimento da cultura da soja em solos com RP superior a 3,50 MPa restringe o desenvolvimento, e consequentemente prejudica a produtividade da cultura.

Figura 1. Resistência a penetração do solo nos diferentes tipos tráfego após 14 meses da adoção do tráfego controlado.



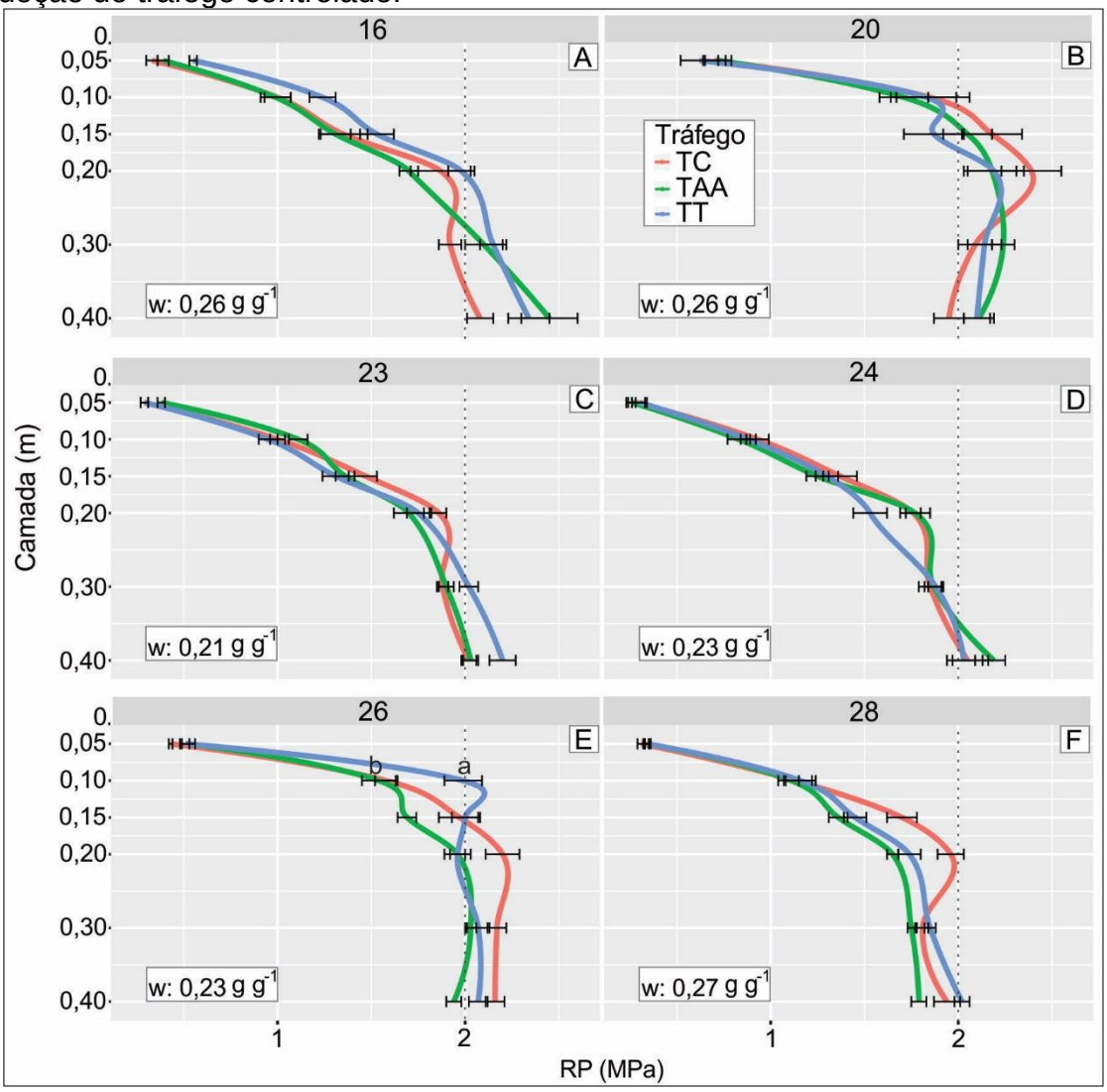
w: teor de umidade do solo médio na camada de 0 – 0,40m.

Na tabela 2, observa-se que na avaliação realizada aos 14 meses não houve diferença entre os tratamentos. Os resultados dessa avaliação, a partir da camada 0,05 m, apresentavam em todos os tratamentos registros acima de 2,0 MPa (Figura1), portanto RP elevada, com valores acima do limite crítico estabelecido por Arshad *et al.* (1996) e Reynolds *et al.* (2002).

As avaliações realizadas aos 16, 20, 23, 24 e 28 meses (Figura 2) não apresentaram diferença estatística para a interação dos fatores tráfego camada. Na avaliação do florescimento da cultura da soja, na safra 2017/18 (aos 26 meses), houve diferença entre os tratamentos, verificados na camada do solo de 0,05 – 0,10 m. O

tratamento TT apresentou a maior RP frente aos demais tratamentos, 26 % superior, o registro de 1,99 MPa praticamente no limite crítico. Para alguns autores o limite crítico é em uma faixa menor, considerada prejudicial e reduzindo a produtividade da cultura da soja RP no intervalo de 1,64 a 2,35 (BEUTLER *et al.*, 2008).

Figura 2. Resistência a penetração realizada após 16, 20, 23, 24, 26 e 28 meses após a adoção do tráfego controlado.



w: teor de umidade do solo médio na camada de 0 – 0,40m. Letras diferentes indicam diferença estatística nas avaliações dos tratamentos para a interação entre tráfego x camada ($P < 0,05$; Tukey).

8.5.2 Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo

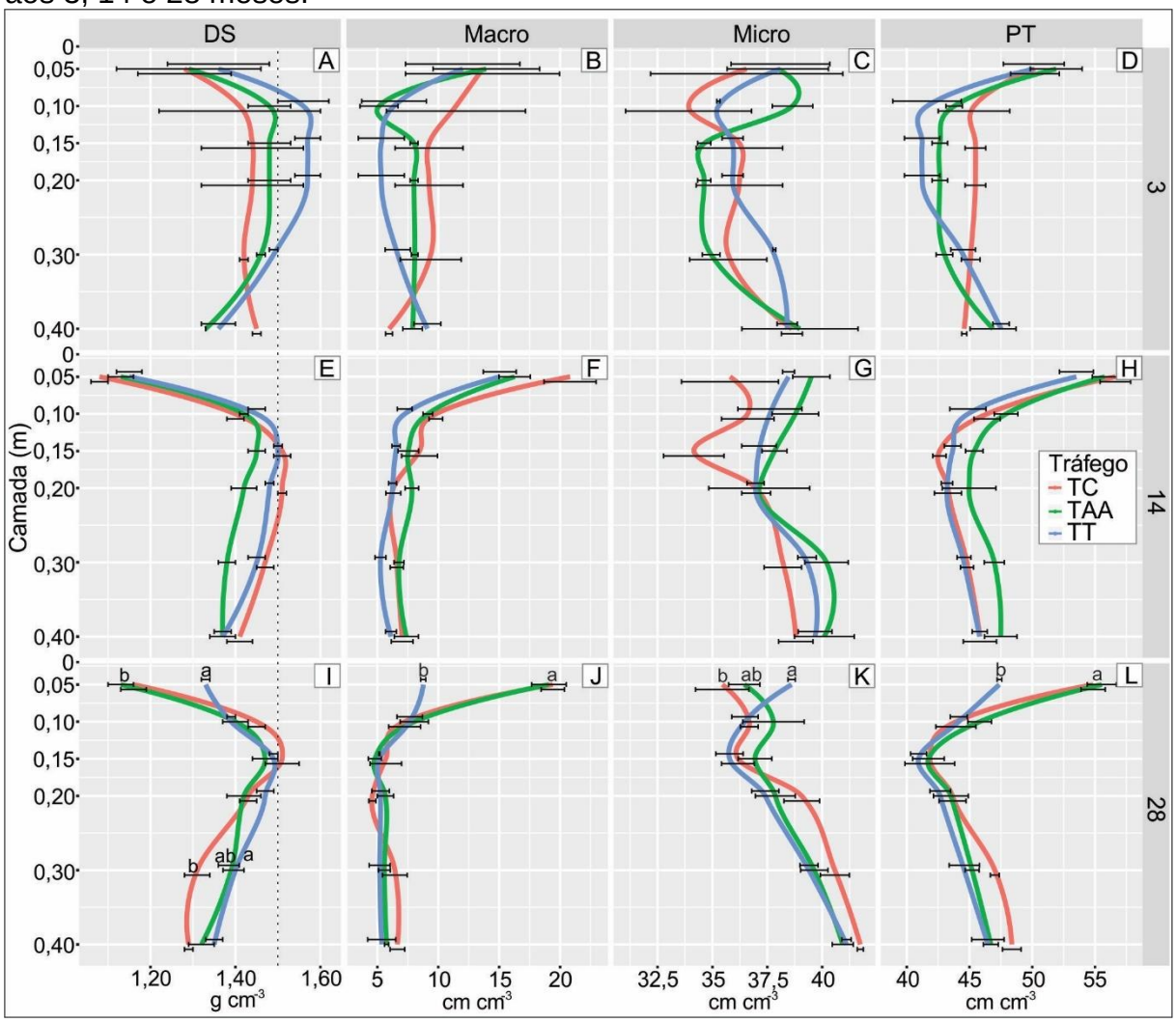
Os anéis volumétricos foram coletados após 3, 14 e 28 meses da adoção do TC. As diferenças estatísticas entre os tratamentos para a interação dos fatores

tráfego x camada são observados apenas na última avaliação, aos 28 meses. Os dados da caracterização inicial são apresentados na sequência da discussão.

Nas Figuras 3A, 3E e 3I, as quais apresentam os dados de DS, foi adicionado uma linha de referência no valor de 1,5 g cm^{-3}. Autores relatam que valores próximo a esse são prejudiciais ao desenvolvimento radicular, como Reichert *at al.*, (2003) que consideram como crítica a DS superior a 1,55 g cm^{-3} para solos de textura média. Já Sato *et al.*, (2015) consideram o valor um pouco inferior, 1,51 g cm^{-3}, como limitante para desenvolvimento do sistema radicular da cultura da soja em solos argilosos.

A caracterização inicial mostrou que os DS resultantes da avaliação eram menores que o considerado limitante, apresentando média para a camada de 0 – 0,40 m de 1,41 g cm^{-3}, e DS mínima de 1,14 g cm^{-3} e máxima de 1,53 g cm^{-3}. Em virtude da adoção do TC e TAA foi observado redução temporal das médias das DS nas avaliações seguintes, apresentando DS de 1,44, 1,39 e 1,37 g cm^{-3}, respectivamente aos 3, 14 e 28 meses. Essa redução média de DS ocorre devido a menor área trafegada, concordando com os resultados de McHugh et al. (2009), onde reportam a redução da DS nos locais sem tráfego, de 1,39 para 1,25 g cm^{-3} , após 22 meses de adoção do TC.

Figura 3. Anéis volumétricos para determinação da densidade (DS), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e porosidade total (PT) do solo para as avaliações aos 3, 14 e 28 meses.



Letras diferentes indicam diferença estatística nas avaliações dos tratamentos para a interação entre tráfego x camada (*P* < 0,05; Tukey).

A camada 0 – 0,05 m (Figura 3I) apresentou diferença estatística entre os tratamentos para a interação tráfego x camada. Os resultados da avaliação aos 28 meses, para DS, mostram que houve redução de 15 % para TAA e 13 % para TC, quando comparados ao TT (1,33 cm^{-3}). Também foi verificado diferença estatística na camada de 0,20 – 0,30 m, apresentando redução de 6 % para TC e 1 % para TAA quando comparados ao TT (1,40 cm^{-3}).

A Macro apresentou média de 7,35 cm^3 cm^{-3} na caracterização inicial, ocorrendo modesto aumento na avaliação realizada após 28 meses da condução da pesquisa, chegando a média de 7,57 cm^3 cm^{-3}, para a camada de 0 – 0,40 m. A Figura 3J expõe a diferença estatística para a camada 0 – 0,05 m na interação tráfego x

camada. Os tratamentos TC e TAA foram semelhantes e não se diferenciam estatisticamente, apresentando médias de 19,40 e 19,09 cm^3 cm^{-3} respectivamente. E apresentam 121 % (TC) e 118 % (TAA) superiores ao TT. A adoção do TC apresentou aumento de 50 e 27 % nas profundidades de 0,10 e 0,30 m (MCHUGH *et al.*, 2009)

As médias das determinações de Micro em relação a caracterização inicial (37,55 cm^3 cm^{-3}) e as demais coletas, apresentaram variação de -3 a +2 %, na camada de 0 – 0,40 m. As determinações de Micro avaliadas aos 28 meses e apresentadas na Figura 3K apresentam diferença estatística entre os tratamentos na camada 0 – 0,05 m, sendo o menor valor observado no tratamento TC (35,45 cm^3 cm^{-3}). Essa redução de TC comparada, aos tratamentos em que as linhas de tráfego sofreram deslocamento, foi de 3 e 8 %, comparado a TAA e TT, respectivamente. Esses resultados são explicados pelo aumento da área da área trafegada, influenciando no aumento da micro. Alguns trabalhos corroboram com os resultados encontrados, relatando as alterações ocorridas nos locais onde ocorreu tráfego de máquinas, verificando o aumento da microporosidade em camadas superficiais (MORAES *et al.*, 2018), e também o aumento de retenção de água no solo nesses locais (LUHAIB *et al.*, 2017).

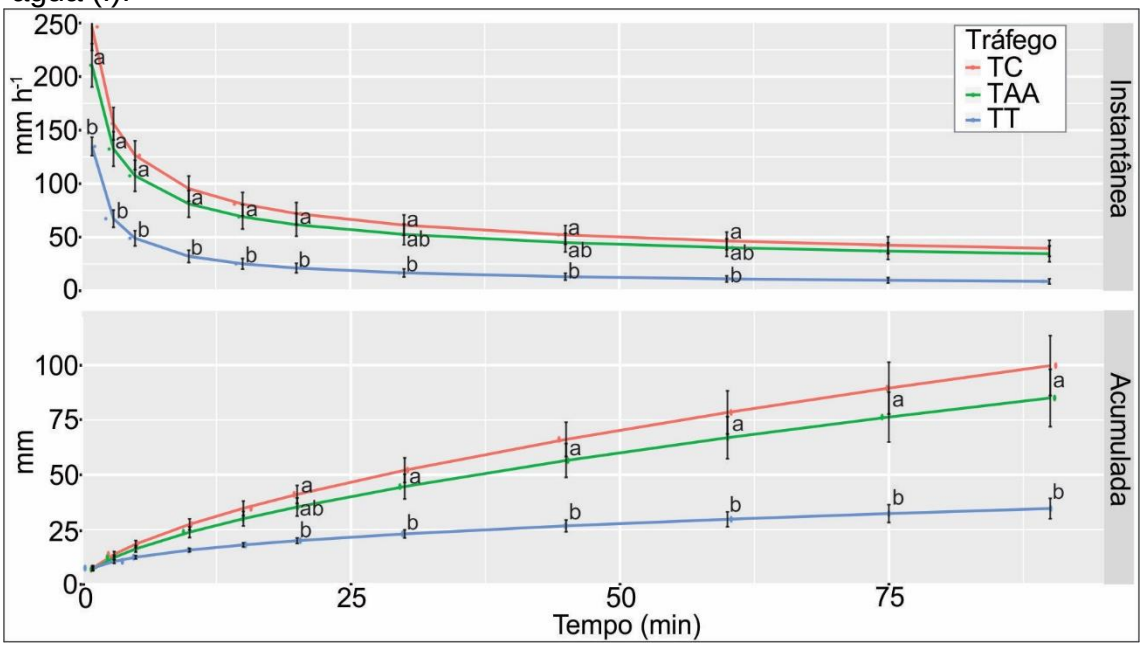
Devido a dependência, a PT (Figura 3L) apresenta diferença estatística na mesma camada (0 – 0,05 m) em que as avaliações de Macro e Micro, na avaliação aos 28 meses. Apesar das diferenças de área livre que os tratamentos apresentam a PT para os tratamentos TC (56,72 cm^3 cm^{-3}) e TAA (57,82 cm^3 cm^{-3}) foi semelhante, já o tratamento TT comparado ao TAA apresenta PT 14% menor para a camada 0 – 0,05 m.

8.5.3 Infiltração de água no solo

Os resultados da infiltração de água no solo, tanto para os dados velocidade de infiltração instantânea (VI), como para infiltração acumulada (I) apresentaram diferença estatística. A diferença apresentada na Figura 4 para infiltração instantânea pode significar que o solo está exposto a erosão devido à baixa infiltração propiciar, em chuvas de alta intensidade, o escoamento superficial. O VI é superior em 50 mm h^{-1} no TC até 20 min e TAA até 10 min quando comparados ao TT. A diferença após

60 min de avaliação ainda foi percebida, a VI do tratamento TC foi superior em 35 mm h^{-1} e TAA superior em 29 mm h^{-1} comparando ao TT.

Figura 4. Avaliação da Velocidade infiltração instantânea (VI), e infiltração acumulada de água (I).



Letras diferentes indicam diferença estatística nas avaliações dos tratamentos para cada tempo (*P* < 0,05; Tukey)

Para os dados de I, a diferença foi verificada entre as medições nos tempos de 20 a 90 min. Nos 70 min, TT acumulou apenas 15 mm, enquanto TAA, 50 mm e TC, 59 mm, sendo o tratamento com maior acumulo nesse intervalo. Após 90 min, o TT apresenta menor I entre os tratamentos; já TAA e TC são superiores em 2,5 e 2,9 vezes, quando comparados ao TT, no final da avaliação. Os resultados de VI e I confirmam resultados de outros trabalhos que apontam que com a adoção do TC, ocorre incremento, sendo umas das variáveis mais sensíveis à compactação do solo (ANTILLE *et al.*, 2015; CHAMEN, 2011, 2015; GIRARDELLO *et al.*, 2016; ISBISTER *et al.*, 2013; TULLBERG *et al.*, 2007)

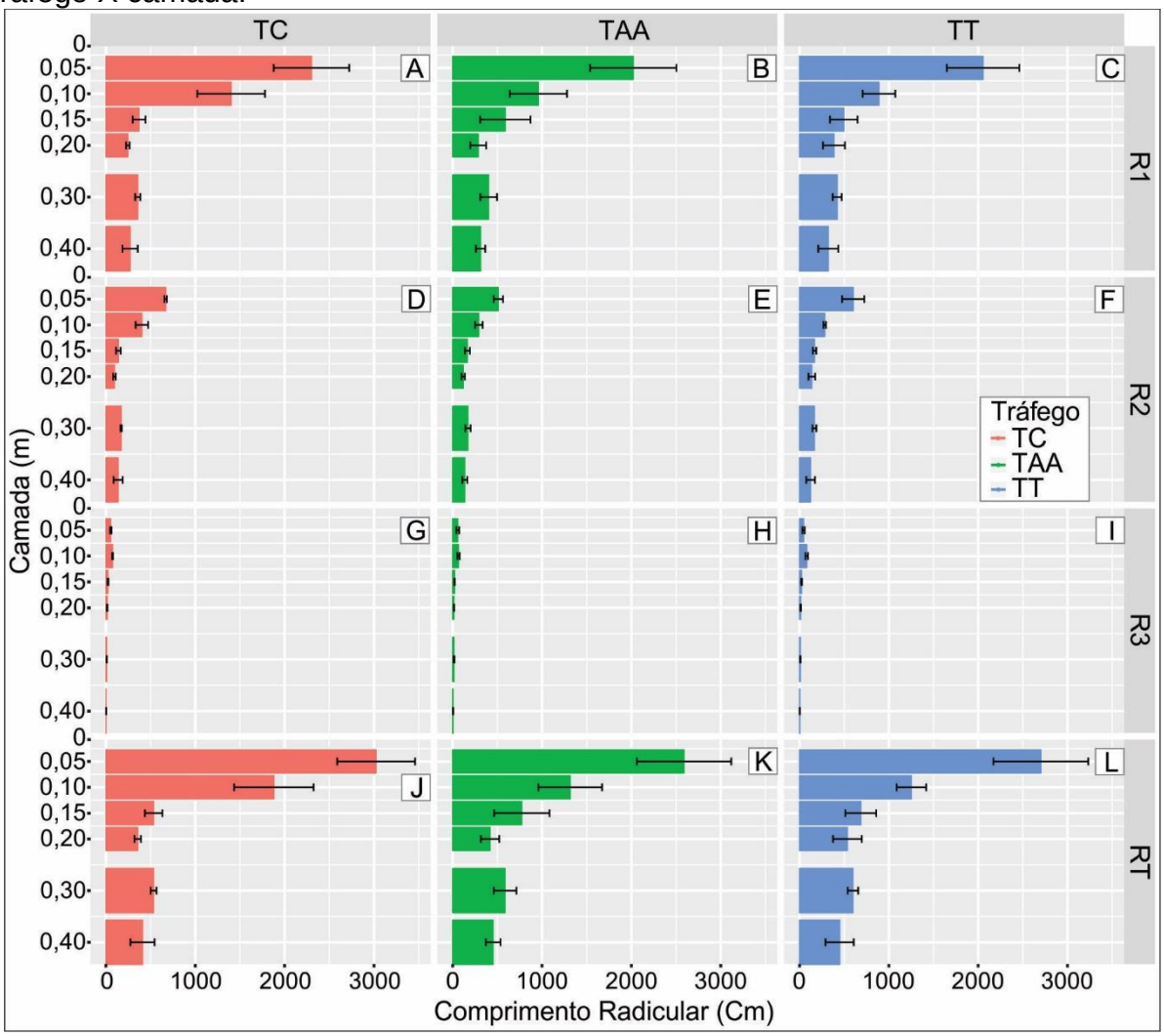
8.5.4 Avaliação do sistema radicular

Os resultados da avaliação do comprimento radicular de soja presente na Figura 5, apresentam o diâmetro estratificado em três classes (R1, R2 e R3), e o conjunto das classes que engloba a todos os diâmetros (RT). Os resultados dos

parâmetros estão de acordo com a ANOVA para a interação tráfego X camada, e não apresentam diferença significativa para o teste de Tukey (*P* <0,05).

Da adoção do TC até a data de avaliação do sistema radicular, passaram-se 26 meses. Possivelmente esse tempo não foi suficiente para que ocorressem melhorias significativas na qualidade do solo. As respostas do tráfego controlado em plantio direto são altamente dependentes do tempo, sendo o estágio de estabilização alcançado em 14 anos (REICHERT *et al.*, 2016).

Figura 5. Avaliação do comprimento raízes de soja safra 2017/18 nas classes de diâmetro R1 (> 0,8 mm), R2 (0,2 – 0,8 mm) e R3 (<0,2 mm) e RT (total) para interação tráfego X camada.

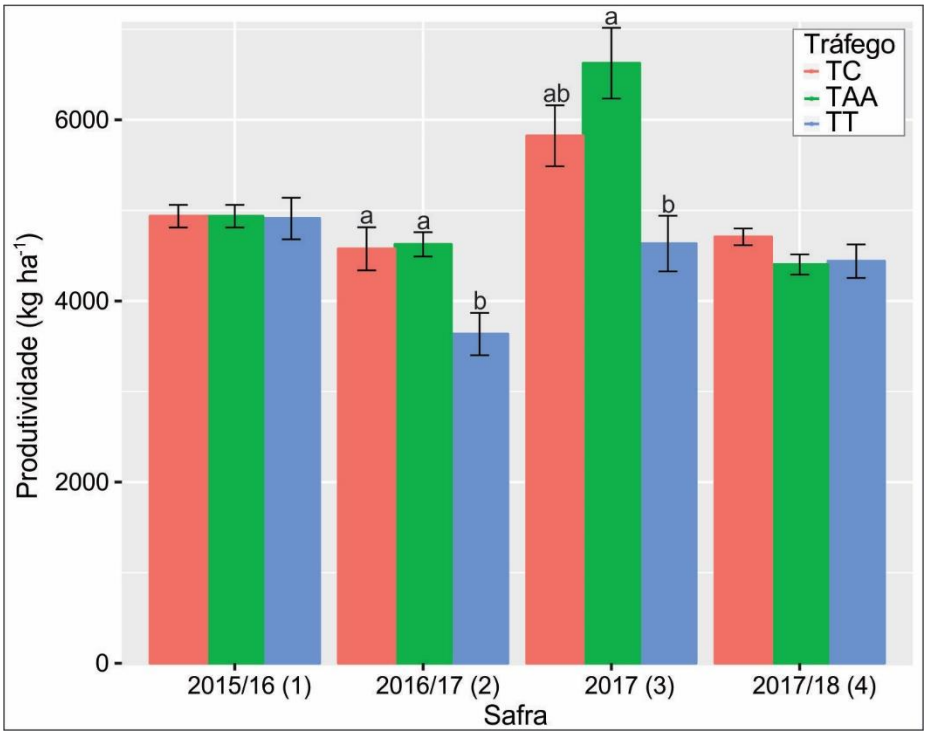


8.5.5 Produtividade das culturas

A Figura 6 apresenta os resultados das quatro avaliações de produtividade, sendo três com fins econômicos – grãos de soja, e aveia com intuito de ciclar

nutrientes, e formação de palha durante o período do inverno para proteção do solo. Os tratamentos afetaram a produtividade nas avaliações da safra da soja 2016/17, e aveia 2017.

Figura 6. Avaliação da produtividade da cultura da soja e a produção de matéria seca da aveia. Safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18 cultura da soja, e safra de 2017 para aveia como cultura de cobertura.

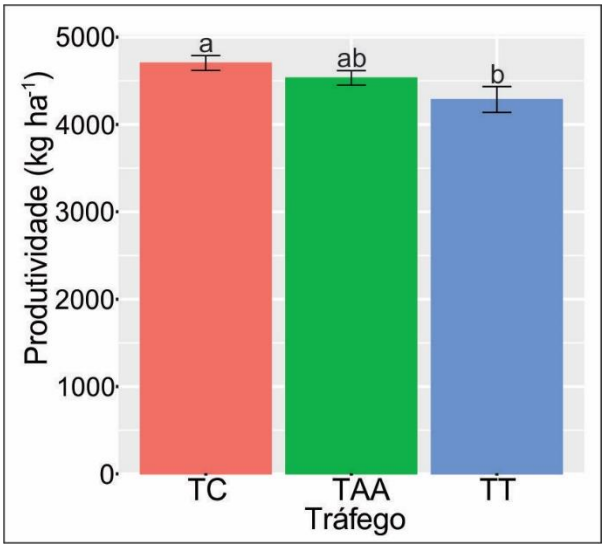


Tratamentos: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). Culturas: Soja (1, 2 e 4), Aveia (3). Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos ($P < 0,05$; Tukey).

Os tratamentos TC e TAA foram estatisticamente iguais na safra 2016/17, e apresentaram produtividade superior ao TT em 26 e 27 %, respectivamente. Já para os dados da massa seca da aveia o tratamento com maior produtividade foi TAA. Ele foi 14 % superior ao TC e 43 % superior ao TT. Já o tráfego controlado foi superior em 26 % à produção de massa seca de aveia, quando comparado ao TT. Em trabalho com produção de pasto para silagem, utilizando tráfego controlado, houve incremento de 13,5 % (HARGREAVES *et al.*, 2017). A cultura da beterraba (*Beta vulgaris* L.) também é beneficiada pelo TC. Resultados apontam incremento produtivo de 10%. Pela utilização de equipamento com maior largura de trabalho a produtividade pode ser aumentada em 30 %, principalmente devido a redução da área afetada pelos pneus (MARINELLO *et al.*, 2017).

Os dados da produtividade média acumulada dos tipos de tráfego estão presentes na Figura 7, e apresentam diferença significativa para os tratamentos. O tratamento TC é o mais produtivo, com média de 4703,17 kg ha^{-1} de grãos. Observando as médias produtivas de soja acumuladas para as três safras, o TC apresenta 14109 Kg, TAA 13599 Kg, seguido pela menor média do tratamento TT 12857 Kg. O TC apresentou produtividade maior que TAA em 4 % e TT em 10 %, enquanto houve incremento menor de TAA (6%) sobre o TT, corroborando com os trabalhos de vários autores que mostram ganhos produtivos pela adoção do TC em várias culturas.

Figura 7. Produtividade média da cultura da soja para as safras 2015/16, 2016/17 e 2017/18.



Tratamentos: tráfego controlado (TC), tráfego alternado anual (TAA) e tráfego tradicional (TT). Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos ($P < 0,05$; Tukey)

8.5.6 Análise econômica

A Tabela 3 apresenta os valores de investimento para adaptação dos implementos, compra de aparelho de GNSS, sinal pago corrigido e mão de obra do prestador de serviço para implementação do tráfego controlado. Também é apresentado a produtividade acumulada, receita e a rentabilidade em área total por hectare, para cada tratamento.

Tabela 3. Valores de receita e rentabilidade acumulados para as três safras, investimentos em adaptação, e aquisição de ferramentas para adoção do tráfego controlado, e retorno do investimento.

Tráfego	TC	TAA	TT
Produtividade de grãos de soja* (Kg)	14110	13599	12858
Receita Bruta[1,2] (89ha)	US$ 409.457,00	US$ 394.648,00	US$ 373.132,00
Rentabilidade[3] (89 ha)	US$ 36.325,00	US$ 21.516,00	-
Receita Bruta[1] (ha^{-1})	US$ 4.602,00	US$ 4.434,00	US$ 4.192,00
Rentabilidade (ha^{-1})	US$ 408,00	US$ 242,00	-

Tipo de Investimentos	Investimento (US$ ha^{-1})	Retorno (safras de soja)	
		TC	TAA
GNSS / Piloto automático	US$ 37.890,00	5,93	10,02
Adaptação de máquinas e implementos	US$ 31.795,00		
Custos anuais (3 anos)**	US$ 2.172,00		
Total	US$ 71.857,00		

[1]Foram considerados apenas os valores de comercialização dos grãos de soja. [2]Obtido a partir da diferença da receita bruta de TT.
* Produtividade da cultura da soja acumulada nas três safras (2015/16 + 2016/17 + 2017/18). ** Valores que o produtor registrou para GNSS sinal e trabalho do prestador de serviços por três anos, e adaptação de máquinas e implementos.

A produção acumulada dos tráfegos representaram acréscimo produtivo de TC em 1252 kg e TAA em 741 kg, quando comparados ao TT. E essas diferenças impactam na rentabilidade que TC apresenta de US$ 36.325,00 (total) e US$ 408,00 (ha^{-1}). Já TAA apresenta US$ 21.516,00 (total) e US$ 242,00 (ha^{-1}) quando comparados ao TT. Para rentabilidade média anual o TC apresenta US$ 136,05 (ha ano^{-1}), TAA US$ 80,58 (ha ano^{-1}).

Para CHAMEN *et al.* (2015) o tráfego controlado em solo argiloso pode incrementar a margem bruta em £117,00 ha^{-1}. Para Hargreaves *et al.* (2017) a adoção do TC em pastagens para silagem utilizando linhas de tráfego que ocupam 15% da área podem representar rentabilidade de £ 98,00 ha^{-1}. Segundo Godwin *et al.* (2015) após a implementação do TC, uma série de fatores como a maior produtividade das culturas, redução do consumo de energia e aumento das taxas de infiltração reduzem a erosão e a inundação. Esses irão melhorar a sustentabilidade agronômica, econômica e ambiental.

O retorno do investimento realizado para implementação do tráfego controlado se dará de forma mais rápida no TC, sendo necessárias aproximadamente 6 safras (5,93) de soja para cobrir os custos. Podendo esse período de retorno ser reduzido, pois a capacidade operacional dos implementos utilizados na propriedade permite implementar o TC em maior área. Blackwell *et al.* (2013) apontam que em uma área

de 2000 ha e investimentos na ordem de US$200.000,00, a adoção do TC trouxe o retorno do investimento entre 1,5 a 2 anos.

8.6 CONCLUSÕES

O tráfego controlado e tráfego alternado anual apresentaram redução da densidade (15 e 13%) e aumento da macroporosidade do solo (121 e 118%) para camada 0 – 0,05m aos 28 meses, e a infiltração de água no solo foi incrementada em 2,9 e 2,5 vezes, quando comparado ao tráfego tradicional.

O incremento produtivo foi verificado para as culturas de aveia e soja na safra 2016/17, representando incremento de 26% para tráfego controlado; já o tráfego alternado anual incrementou as produtividades dessas culturas em 43 e 27%. O incremento médio da adoção do tráfego controlado, durante as três safras de soja, foi de 10%, enquanto o tráfego alternado anual apresentou incremento de 6%. A rentabilidade obtida pela adoção do tráfego controlado foi de US$136,05 ha ano^{-1}; já a previsão de retorno se dá em 5,93 safras.

As observações demonstram que o tráfego alternado anual apresentou melhora nos atributos avaliados, no entanto é mais prudente que sejam realizadas avaliações nesse sistema por um período mais longo.

A adoção do tráfego controlado demonstra ser uma alternativa para ser adotada no sistema de plantio direto, devido as melhorias significativas, em curto prazo, que esse sistema propicia em relação à infiltração de água, produtividade e rentabilidade.

8.7 REFERÊNCIAS

AGROLINK. Cotação Soja Carazinho-RS. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/regional/rs/carazinho/cotacoes>. Acesso em: 2 ago. 2018.

ALBA, P. J. et al. Tráfego controlado em culturas de grãos no RS: princípios, desafios e resultados preliminares. **Revista Plantio Direto** v.122, n. março-abril, p.1–12, 2011.

AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **R. Bras. Ci. Solo** v. 25, n. 1, p.189–197, 2001.

ANTILLE, D. L. et al. Potential to increase productivity and sustainability in Argentine an agriculture with controlled traffic farming: a short discussion. **Acta Technologica**

Agriculturae v. 18, n. 3, p.83–87, 2015.

ANTILLE, D. L.; et al. The Potential of Controlled Traffic Farming to Mitigate Greenhouse Gas Emissions and Enhance Carbon Sequestration in Arable Land: A Critical Review. **Transactions of the ASABE** p.707–731, 22 jun. 2015.

ARSHAD, M A; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., ed. **Methods for assessing soil quality.** Madison: Soil Science Society of America, p.123-141. 1996.

BEUTLER, A. N. et al. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.43, n. 11, p.1591–1600, 2008.

BLACKWELL, P. et al. Pathways to more grain farming profit by Controlled Traffic Farming in WA. **GRDC Update Papers,** p.1–5, 2013.

CHAMEN, W. C. T. Controlled traffic farming - from worldwide research to adoption in Europe and its future prospects. **Acta Technologica Agriculturae**, v. 18, n. 3, p. 64–73, 2015.

CHAMEN, W. C. T. et al. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research** v.146, p.10–25, 2015.

CHAMEN, W. C. T. The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types. PhD Thesis, Cranfield University p.305, 2011.

DECHEN, S. C. F. et al. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**. v. 74, n. 2, p.224–233, abr. 2015.

GIRARDELLO, V. C. et al. Benefícios do tráfego controlado de máquinas no Rio Grande do Sul. In: SANTI, A.L. et al. (Orgs.). Agricultura de Precisão no Rio Grande do Sul. 1.ed. Santa Maria, Brasil. p.189–212. 2016.

GIRARDELLO, V. C. et al. Soil penetration resistance, Efficiency of mechanical chisel plowing and soybean grain yield in a clayey oxisol under long-term no-till. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo.** v. 38, n.4, 2014.

GODWIN, Richard et al. Results From Recent Traffic Systems Research And The Implications For Future Work. **Acta Technologica Agriculturae** v. 18, n. 3, p. 57–63, 2015.

HARGREAVES, P. R. et al. Potential for Controlled Traffic Farming (CTF) in Grass Silage Production: Agronomics, system design and economics. **Advances in Animal Biosciences** v. 8, n. 02, p.776–781, 2017.

ISBISTER, B. et al. Controlled Traffic Farming Technical Manual. Western Australia: Department of Agriculture and food, p.80, 2013.

KROULÍK, M. et al. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. **Soil and Tillage Research** v.105, n.1, p.171–175, 2009.

KUZNETSOVA, Alexandra; BROCKHOFF, Per B; CHRISTENSEN, Rune H B. {lmerTest} Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. **Journal of Statistical Software** v. 82, n. 13, p.1–26, 2017.

LUHAIB, A. A. et al. Effect of controlled traffic farming on energy saving in Australian grain cropping systems. 2017, St. Joseph, MI: **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, p1-9 2017.

MARINELLO, F. et al. Traffic effects on soil compaction and sugar beet (Beta vulgaris L.) taproot quality parameters. **Spanish Journal of Agricultural Research** v. 15, n. 1, p.1–8, 2017.

MCHUGH, A. D.; TULLBERG, J. N.; FREEBAIRN, D. M. Controlled traffic farming restores soil structure. **Soil and Tillage Research** v. 104, n. 1, p. 164–172, 2009.

MORAES, M. T.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Corn crop performance in an Ultisol compacted by tractor traffic. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** v.53, n.4, p.464–477, 2018.

ONU. World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2017.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing . Vienna, Austria. 2018

REICHERT, J. M. et al. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research** v. 158, p. 123–136, 2016.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. QUALIDADE DOS SOLOS E SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS AGRÍCOLAS**. Ciência & Ambiente** v. 27, p. 29–48, 2003.

REYNOLDS, W.D et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma** v.110, n. 1–2, p.131–146, nov. 2002.

SATO, M. K. et al. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **International Agrophysics.** v. 29, n. 4, p. 441–447, 2015.

SILVA, R. L.; DE MARIA, I. C. Erosão em sistema plantio direto: influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, n. 6, p.554–561, 2011.

SILVEIRA, D. C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p.659–667 jun. 2010.

TULLBERG, J. N.; YULE, D. F.; MCGARRY, D. Controlled traffic farming-From research to adoption in Australia. **Soil and Tillage Research** v. 97, n. 2, p. 272–281, 2007.

TULLBERG, J. Tillage, traffic and sustainability-A challenge for ISTRO. **Soil and Tillage Research** v.111, n.1, p.26–32, 2010.

UOL, Economia. Cotação do Dólar. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/cotacoes/>. Acesso em: 2 ago. 2018.

VENABLES, W N; RIPLEY, B D. Modern Applied Statistics with S 4ª ed. New York: Springer, 2002.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados do estudo dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico típico localizado em Carazinho - RS e do desempenho da cultura da soja, submetidos a diferentes tipos de tráfego agrícola sob plantio direto, concluímos que a adoção do tráfego controlado, por três anos consecutivos, promoveu a redução da densidade e aumento da macroporosidade do solo para camada 0-0,05m. A infiltração de água no solo foi altamente influenciada, sendo a infiltração acumulada superior em 19,6 vezes nos locais livre de tráfego e 2,9 vezes quando considerado em área total de TC.

As avaliações realizadas para o comprimento do sistema radicular da cultura da soja não foram influenciadas pelas intensidades de tráfego.

O incremento produtivo médio do TC e TAA (nas 3 safras de soja) foi de 10 a 6%, para a produtividade acumulada. Já o incremento produtivo do TAA na produção de massa seca da aveia foi 43%, e TC 26%, frente ao tráfego tradicional.

Os resultados da análise econômica pela adoção do TC apontam que o retorno do investimento se dará em aproximadamente 6 safras, já a rentabilidade foi de US$136,05 ha ano^{-1}.

Logo, se um produtor utilizar a mesma técnica em uma área maior nas culturas de verão e ampliá-la para as culturas de inverno, poderá aumentar seu potencial de rentabilidade. Também concluímos que a técnica pode ser indicada, mesmo para produtores com menor área, pois os dados apontam um rápido retorno do investimento, bem como benefícios ambientais e a significativa melhoria na qualidade do solo.

Ainda em relação aos ganhos proporcionados ao produtor, é preciso levar em conta os custos da adoção do TC, uma vez necessária a padronização de bitolas e largura de trabalho que devem ser feitas para reduzir os rastros dos pneus nas lavouras e consequentemente a alteração/adequação dos maquinários. A partir desta experiência, sugere-se às indústrias a necessidade de ampliar a oferta de máquinas e implementos padronizados para o público que desejar aderir ao TC, podendo tratar-se de um nicho promissor de mercado, a ser explorado no Brasil.

10. REFERÊNCIAS

AGROLINK. Cotação Soja Carazinho-RS. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/regional/rs/carazinho/cotacoes>. Acesso em: 2 ago. 2018.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

APSULAMÉRICA. 2º APsul América. Disponível em: <http://apsulamerica.com.br/galeria/2o-apsul-america/>. Acesso em: 22 jun. 2018.

ASAE, Engineers american society of agricultural. Soil cone penetrometer. SAE **Agricultural Engineers Yearbook** n.313:1, p.368–369, 1976.

BERNARDO, S et al. **Manual de Irrigação.** 8ª Edição ed. Viçosa, MG: Editora UFV, p. 625, 2006.

BERTOLLO, G. M. Desempenho e emissões de trator em semeadura com diferentes configurações de sulcadores em área com tráfego controlado de máquinas. Tese de doutorado, PPGEA, UFSM, p. 139, 2018.

BERTOLLO, G. M. et al. Desempenho de trator em semeadura com diferentes configurações de sulcadores em área com tráfego controlado de máquinas. **Revista de Engenharia Agrícola** v.38, n. 5, 2018.

BÖHM, W. Methods of Studying Root Systems. **Ecological Studies,** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p.188, 1979.

CARVALHO, D.; BATISTA, L. D. Infiltração. Hidrologia. 1a ed. Rio de Janeiro, RJ: p. 60–80, 2006.

COTRIJAL. Cotrijal, histórico de chuvas. Disponível em: <http://cotrijal.com.br/chuva>. Acesso em: 25 maio. 2018.

CQFS RS/SC. Manual de adubação e de calagem para o Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, RS, Brasil. 400 p. 2004.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ. 573 p. 2017.

EMBRAPA. Manual de Métodos de Análise de Solo. 1ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, p.271. 1979.

EMBRAPA, Clima Temperado. Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. p. 334, 2012.

EMBRAPA, Solos. Manual de Métodos de Análise de Solo. 2º ed. Rio de Janeiro, RJ, p. 230, 2011.

ISBISTER, B. et al. Controlled Traffic Farming Technical Manual. Western Australia: Department of Agriculture and food, p. 80, 2013.

KROULÍK, M.et al. The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. **Soil and Tillage Research,** v.105, n.1, p.171–175, 2009.

LI, H. et al. Soybean root traits after 24 years of different soil tillage and mineral phosphorus fertilization management. **Soil and Tillage Research,** v.165, p.258–267, 2017.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2018

SANTOS, H. G. et al. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 353, 2013.

TEDESCO, M J. et al. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.174, 1995.

TEIXEIRA, T. G. et al. Adoção do tráfego controlado agrícola e resultados para soja no RS. In: AMARAL, Lúcio de Paula (Org.). **Trabalhos completos do IV congresso sulamericano de agricultura de precisão e máquinas precisas**. 1. ed. Não-Me-Toque – RS: [s.n.], p. 374–381, 2018.

TRIMBLE. Trimble RTX Technology. Disponível em: <https://www.trimble.com/Positioning-Services/Trimble-RTX.aspx>. Acesso em: 6 jun. 2017.

UOL, Economia. Cotação do Dolar. Disponível em: <https://economia.uol.com.br/cotacoes/>. Acesso em: 2 ago. 2018.

USDA, Keys to soil taxonomy. USDA. 2014.

VENABLES, W N; RIPLEY, B D. Modern Applied Statistics with S 4ª ed. New York: Springer, 2002.

WRB, World reference base for soil resources 2014. International soil classification system, World Soil Resources Reports No. 106. 2015.