

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LEONARDO LEONIDAS KMIECIK

MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO, ATRIBUTOS DO SOLO E EFICIENCIA  
ENERGÉTICA EM MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM

CURITIBA

2021

LEONARDO LEONIDAS KMIECIK

MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO, ATRIBUTOS DO SOLO E EFICIENCIA  
ENERGÉTICA EM MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Samir Paulo Jasper

CURITIBA

2021

Kmiecik, Leonardo Leonidas

Mapas de isocompactação, atributos do solo e eficiência energética em modalidades de colheita de silagem. - Curitiba, 2021.

84f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientação: Samir Paulo Jasper

1. Propriedades do solo. 2. Energia. 3. Silagem. I. Jasper, Samir Paulo. II. Título. III. Universidade Federal do Paraná.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LEONARDO LEONIDAS KMIECIK** intitulada: **MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO, ATRIBUTOS DO SOLO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM**, sob orientação do Prof. Dr. SAMIR PAULO JASPER, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Maio de 2021.

Assinatura Eletrônica

14/05/2021 11:25:19.0

SAMIR PAULO JASPER

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

14/05/2021 11:29:22.0

FABRICIO CAMPOS MASIERO

Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE)

Assinatura Eletrônica

14/05/2021 11:29:57.0

JORGE WILSON CORTEZ

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS)

---

Rua dos Funcionários, 1540 - CURITIBA - Paraná - Brasil  
CEP 80035-050 - Tel: (41) 3350-5648 - E-mail: [pgcisolo@ufpr.br](mailto:pgcisolo@ufpr.br)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 91229

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 91229

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiou e esteve ao  
meu lado

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus pela graça da vida e por me iluminar e mostrar o caminho correto todas as vezes e principalmente por me provar que sou capaz.

A minha família pelo amor, incentivo e amor incondicional, dando-me suporte e incentivo nas horas difíceis de desânimo e cansaço.

A minha namorada pela paciência, incentivo e pelo apoio em estar comigo em mais uma etapa da vida acadêmica.

Ao meu amigo de longa data Guilherme Chulis por todo o apoio e incentivo ao longo de todos esses anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samir Paulo Jasper, pela confiança e pela credibilidade desde o início da graduação, pelos conselhos e principalmente pela orientação na vida acadêmica como um todo. Sem seu cuidado e dedicação ao longo de todos esses anos, jamais teria chegado até aqui.

A todos os amigos do LATA – Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas, em especial ao Daniel Savi, Gabriel Ganancini Zimmermann, Lauro Strapasson Neto e Adailto Garcia por toda a ajuda, tempo dedicado, parceria e pronta disposição ao longo de todos esses anos, projetos e artigos desenvolvidos. Agradeço também a Guinther Hugo Grudtner, Gabriele S. de Campos, Eduardo Gracietti por toda ajuda nas coletas de campo dessa dissertação.

A Fazenda Experimental Canguiri, por ceder área e pessoal para o desenvolvimento desta pesquisa.

A CNH Industrial e a JF máquinas pela disponibilidade de tratores, equipamentos e todo o suporte técnico para o desenvolvimento de mais uma pesquisa junto ao LATA.

Ao CNPq pelo apoio financeiro em parte deste percurso.

A todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte desta etapa.

Obrigado!

## RESUMO

Como forma de reduzir o tráfego agrícola nas áreas de produção de silagem e por consequência aumentar a eficiência energética da operação, tem-se buscado máquinas colhedoras de forragem acopladas ao trator agrícola, que colham mais de uma linha por passada, conhecidas como equipamentos de área total, colhendo até 5 linhas de milho de uma única vez. Assim, objetivou-se avaliar o desempenho energético, operacional, os efeitos físicos no solo e por fim a geração de mapas de compactação de duas colhedoras de forragem (uma de linha única e outra de área total). Os tratores foram instrumentados com sensores que permitiram mensurar a rotação do motor, velocidade operacional e consumo horário de combustível, possibilitando o cálculo da capacidade de campo operacional, consumo de combustível por área e por massa colhida, além da capacidade de produção dos conjuntos. Foram coletados anéis indeformados de solo para análise de micro, macro e porosidade total, umidade volumétrica e densidade do solo, e também com o uso de penetrometro eletrônico a avaliação da resistência do solo à penetração até a profundidade de 0,40 m. O equipamento de linha única teve maior velocidade de deslocamento e menor consumo horário de combustível, mas menor área trabalhada por tempo refletindo em menos material processado além do maior gasto energético para a massa colhida. A utilização de conjunto de transbordo com a colhedora frontal, possibilita maior velocidade de deslocamento, com incremento na área trabalhada e no processamento de material, não diferindo em gasto de combustível por massa colhida mesmo com o uso de mais um trator no apoio da colheita. Os dois conjuntos de colheita reduziram a macro e porosidade total do solo na camada de 0-0,2m, e o conjunto de colheita com área total trouxe incremento na densidade do solo nessa camada. Todos os tratamentos não diferiram entre si no quesito porosidade e densidade do solo nas profundidades avaliadas. A resistência do solo à penetração (RSP) foi influenciada pelas modalidades de colheita principalmente nos primeiros 0,15 m de profundidade sendo mais notável no uso do conjunto de área total, e a partir dos 0,2 m até a profundidade máxima avaliada não diferiram entre si e da entrelinha da passagem do rodado. Por meio de mapas de isocompactação foi possível realizar uma análise visual da localização das áreas com maior RSP, podendo desta forma ser utilizado com orientação para descompactação de solo de forma localizada.

Palavras-chave: *Zea Mays*, eficiência energética, propriedades físicas do solo, compactação.

## ABSTRACT

As a way to reduce agricultural traffic in the silage production areas and consequently increase the energy efficiency of the operation, forage harvesting machines coupled to the agricultural tractor have been sought, which harvest more than one row per pass, known as area equipment total, harvesting up to 5 rows of corn at once. Thus, the objective was to evaluate the energetic and operational performance, the physical effects on the soil and, finally, the generation of compaction maps of two forage harvesters (one with a single row and the other with a total area). The tractors were instrumented with sensors that allowed measuring engine speed, operating speed and hourly fuel consumption, enabling the calculation of operational field capacity, fuel consumption by area and by harvested mass, in addition to the production capacity of the sets. Undisturbed soil rings were collected for analysis of micro, macro and total porosity, volumetric moisture and soil density, and also using an electronic penetrometer to assess soil resistance to penetration up to a depth of 0.40 m. The single-line equipment had a higher displacement speed and lower hourly fuel consumption, but a smaller area worked per time, resulting in less processed material, in addition to higher energy expenditure for the harvested mass. The use of a transshipment set with the front harvester allows for greater displacement speed, with an increase in the area worked and in material processing, not differing in fuel expenditure per harvested mass, even with the use of another tractor to support the harvest. The two harvest sets reduced the macro and total porosity of the soil in the 0-0.2m layer, and the harvest set with total area brought an increase in soil density in this layer. All treatments did not differ in terms of porosity and soil density at the depths evaluated. The soil resistance to penetration (RSP) was influenced by the harvesting modalities, mainly in the first 0.15 m of depth, being more remarkable in the use of the total area set, and from 0.2 m to the maximum depth evaluated, they did not differ between each other and between the lines of the wheelset passage. By means of isocompaction maps, it was possible to perform a visual analysis of the location of areas with higher RSP, which can therefore be used with guidance for localized soil decompaction.

Keywords: *Zea Mays*, energy efficiency, physical soil properties, compaction

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

FIGURA 1 - TEMPERATURA MÉDIA ( $T_{med}$ ), MÍNIMA ( $T_{min}$ ) E MÁXIMA ( $T_{max}$ ) DO AR E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DURANTE OS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MILHO.....	20
FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI - PR.....	21
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MODALIDADES DE COLHEITA $T_{LU}$ (A), $T_{AT}$ (B) E $T_{ATT}$ (C).....	24

### CAPÍTULO II

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI – PR.....	38
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MODALIDADES DE COLHEITA $T_{LU}$ (A), $T_{AT}$ (B) E $T_{ATT}$ (C).....	40
FIGURA 3 – IMPRESSÃO DA ÁREA DE CONTATO DO PNEU DIANTEIRO DIREITO DO CONJUNTO A .....	42
FIGURA 4 – AMOSTRAS INDEFORMADAS SENDO SATURADAS (A) E SUBMETIDAS A TENSÃO DE COLUNA DE ÁGUA 6 KPA NO FUNIL DE PLACA POROSA.....	44
FIGURA 5 – PENETRÔMETRO FALKER PLG 1020.....	47

### CAPÍTULO III

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI – PR.....	61
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MODALIDADES DE COLHEITA $T_{LU}$ (A) E $T_{ATT}$ (B).....	63
FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS TRATAMENTOS AO LONGO DA ÁREA EXPERIMENTAL. A ESQUERDA O TRATAMENTO $T_{ATT}$ E A DIREITA O TRATAMENTO $T_{LU}$ .....	65
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS GRIDS AMOSTRAIS USADOS NA ÁREA DE ESTUDO, PARA OS TRATAMENTOS $T_{ATT}$ A ESQUERDA $T_{LU}$ A DIREITA.....	66
FIGURA 5 – MAPA TEMÁTICO DA RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (RSP) NAS PROFUNDIDADES 0-0,1 M (A), 0,1-0,2 M (B), 0,2-0,3M (C) E 0,3-0,4M (D) PARA O TRATAMENTO $T_{ATT}$ .....	72
FIGURA 6 – MAPA TEMÁTICO DA RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (RSP) NAS PROFUNDIDADES 0-0,1 M (A), 0,1-0,2 M (B), 0,2-0,3M (C) E 0,3-0,4M (D) PARA O TRATAMENTO $T_{LU}$ .....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

### CAPÍTULO II

- GRÁFICO 1 – MACRO, MICRO E POROSIDADE TOTAL ( $M^3 M^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM),  $T_{LU}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA),  $T_{AT}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E  $T_{ATT}$  (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NA CAMADA DE 0 – 0,2 M .....48
- GRÁFICO 2 - MACRO, MICRO E POROSIDADE TOTAL ( $M^3 M^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM),  $T_{LU}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA),  $T_{AT}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E  $T_{ATT}$  (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NA CAMADA DE 0,2 – 0,4 M .....49
- GRAFICO 3 – UMIDADE VOLUMÉTRICA ( $CM^3 CM^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM),  $T_{LU}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA),  $T_{AT}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E  $T_{ATT}$  (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NAS PROFUNDIDADES AVALIADAS...50
- GRÁFICO 4 – DENSIDADE DO SOLO ( $G CM^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM),  $T_{LU}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA),  $T_{AT}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E  $T_{ATT}$  (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NAS PROFUNDIDADES AVALIADAS...51
- GRÁFICO 5 – RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO ( $MPA$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: ENTRELINHA,  $T_{LU}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA),  $T_{AT}$  (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E  $T_{ATT}$  (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO).....53

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS TRATORES DOS CONJUNTOS A E B.....	22
TABELA 2 –QUANTIDADE DE LASTRO SÓLIDO, DISTRIBUIÇÃO DE MASSA SOBRE O EIXO E MASSSA TOTAL DOS CONJUNTOS A E B .....	22
TABELA 3 - MÉDIAS DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTICULA E MATÉRIA SECA DO MATERIAL COLHIDO PELOS CONJUNTOS A E B .....	26
TABELA 4 - SÍNTESE DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE MÉDIAS PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS .....	28

### CAPÍTULO II

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS TRATORES DOS CONJUNTOS A E B.....	39
TABELA 2 – QUANTIDADE DE LASTRO SÓLIDO, DISTRIBUIÇÃO DE MASSA SOBRE O EIXO E MASSSA TOTAL DOS CONJUNTOS A, B E DO TRATOR DE APOIO (TRANSBORDO).....	41
TABELA 3 – PRESSÃO MÉDIA (kPa) APLICADA AO SOLO PELOS RODADOS NOS DOIS CONJUNTOS DE COLHEITA E DE APOIO UTILIZADOS NO EXPERIMENTO.....	43
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	43

### CAPÍTULO III

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS TRATORES DOS CONJUNTOS A E B.....	62
TABELA 2 – QUANTIDADE DE LASTRO SÓLIDO, DISTRIBUIÇÃO DE MASSA SOBRE O EIXO E MASSSA TOTAL DOS CONJUNTOS A, B E DO TRATOR DE APOIO (TRANSBORDO).....	64
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	68
TABELA 4 – PARÂMETROS DE ESTATISTICA DESCRITIVA PARA A RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (Mpa).....	69
TABELA 5 – PARAMETROS DO AJUSTE DO SEMIVARIOGRAMA PARA A RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO.....	71

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>16</b>
<b>2 CAPÍTULO I: MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM DE PLANTA INTEIRA: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESEMPENHO OPERACIONAL .....</b>	<b>18</b>
2.1 RESUMO.....	18
2.2 ABSTRACT .....	18
2.3 INTRODUÇÃO .....	19
2.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	20
2.4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	20
2.4.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	21
2.4.3 PARÂMETROS AVALIADOS PARA A ANÁLISE ENERGÉTICA.....	24
2.4.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COLHIDO .....	26
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
2.6 CONCLUSÕES .....	30
2.7 REFERÊNCIAS.....	31
<b>3 CAPÍTULO II: ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SUBMETIDOS A MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM DE PLANTA INTEIRA .....</b>	<b>35</b>
3.1 RESUMO.....	35
3.2 ABSTRACT .....	36
3.3 INTRODUÇÃO .....	36
3.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	38
3.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	38
3.4.2 DESCRIÇÃO DOS CONJUNTOS DE COLHEITA UTILIZADOS .....	39
3.4.3 ANÁLISES DE SOLOS.....	44
3.4.3.1 GRANULOMETRIA .....	44
3.4.3.2 POROSIDADE DO SOLO .....	45
3.4.3.3 UMIDADE VOLUMÉTRICA E DENSIDADE DO SOLO.....	47
3.4.3.4 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RSP).....	48
3.4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	49
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
3.6 CONCLUSÕES .....	56
3.7 REFERÊNCIAS.....	57

<b>4 CAPÍTULO III: MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO EM MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM.....</b>	<b>60</b>
4.1 RESUMO.....	60
4.2 ABSTRACT .....	60
4.3 INTRODUÇÃO .....	61
4.4 MATERIAL E MÉTODOS .....	62
4.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL .....	62
4.4.2 DESCRIÇÃO DOS CONJUNTOS DE COLHEITA UTILIZADOS .....	63
4.4.3 RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (RSP) .....	67
4.4.4 GRANULOMETRIA E UMIDADE GRAVIMÉTRICA .....	69
4.4.5 ANÁLISE DE DADOS.....	70
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	71
4.6 CONCLUSÕES .....	74
4.7 REFERÊNCIAS.....	75
<b>5 CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>78</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A utilização de alimentos conservados, como por exemplo a silagem, é de suma importância no contexto dos sistemas pecuários, sejam eles com objetivo de leite ou de carne. Esta fonte conservada de alimento animal pode ser utilizada nas épocas de baixo desenvolvimento de pastagens devido ao clima ou ao déficit hídrico ou como alimento constante no desenvolvimento animal (VIEIRA et al., 2013)

O milho é a cultura comumente utilizada para a produção de silagem, devido ao valor nutricional e a produtividade. Outro grande ponto é a disponibilidade no mercado de diversos híbridos que atendem as mais diversas finalidades de uso e condições de cultivo, e que influenciam diretamente na qualidade da silagem a ser produzida (KLEIN et al., 2018).

O estágio em que esta cultura se encontra no momento da produção da silagem afeta diretamente a qualidade do alimento resultante. No caso do milho, o percentual de matéria seca para a melhor qualidade final da silagem é de 30 a 35%, momento em que a consistência dos grãos está entre pastoso e farináceo duro correspondendo a linha do leite ente 1/3 e 2/3 do grão (FERRARETTO et al. 2018). Desta forma, devido a necessidade da rápida retirada da forragem do campo, a entrada de máquinas na área para a colheita pode não respeitar o teor de água no solo adequado, promovendo degradação da estrutura e perda de potencial produtivo (LANES et al., 2006; MACRÌ et al., 2017).

A colheita da planta inteira para silagem representa problema para os atributos físicos do solo, pela não deposição de biomassa sobre a superfície, tendo significativo impacto na densidade do solo, resistência à penetração e estabilidade de agregados, principalmente em áreas que se faz o cultivo anual para este fim (VILLAMIL et al. 2015). Estudos como de Obrycki et al. (2018) comprovam que após cinco anos de retirada de 60% da palhada do milho após a colheita do grão, há decréscimo na matéria orgânica particulada, sugerindo que em longo prazo a sustentabilidade do solo pode ser afetada. Jemison et al. (2019) ressalta que ao utilizar a parte aérea do milho para silagem reduz-se quantidade de resíduo vegetal sob a superfície para proteção contra a erosão, o que acaba promovendo a degradação do solo e comprometendo a qualidade da água devido à perda de solo.

Atualmente, existe diversidade de modelos de máquinas para colheita de silagem, atendendo a várias espécies vegetais, teores de umidade do material,

condições do terreno e tamanho de área. Dentre as responsáveis pela colheita de planta inteira, destacam-se aquelas que são acopladas aos tratores agrícolas através do sistema hidráulico de três pontos e acionados pela tomada de força do trator (YANG et al., 2016).

A resistência do solo à penetração, junto a densidade do solo e a porosidade são atributos amplamente estudados devido a sua relação direta com a produtividade das culturas, pois podem causar uma barreira física ao desenvolvimento radicular, delimitando a expansão das raízes, a absorção de água e nutrientes e as trocas gasosas.

O estudo da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo permite compreender melhor os processos relacionados a estabilidade dos solos e seus processos erosivos, permitindo direcionar o manejo das áreas. D'Or & Destain (2016) utilizaram de indicadores de suscetibilidade dos solos à compactação aliado a geoestatística para geração de mapas de risco de compactação em Walloon, Bélgica, sob diversos cenários, possibilitando assim orientar políticas de proteção e conservação do solo de maneira localizada.

O uso eficiente de energia é requisito para agricultura sustentável, minimizando problemas ambientais e a destruição dos recursos naturais, e promovendo a sustentabilidade como meio econômico em sistemas de produção (BARAN & GOKDOGAN, 2016). Dentre os processos envolvidos, os custos com maquinários e mão-de-obra durante a colheita tem grande participação na planilha de custos da silagem, devendo-se então buscar operações mecanizadas que tragam a máxima eficiência, reduzindo-se assim o custo (HARMON & LUCK, 2016).

Portanto, objetivou-se avaliar colhedoras de forragem acopladas a trator, de linha única de colheita lateral e outra frontal de área total, com o adicional de um conjunto transbordo de suporte na colheita quando utilizado a colhedora frontal. Avaliou-se o desempenho energético e operacional, os atributos físicos do solo e mapas de isocompactação por meio de resistência do solo a penetração, durante a operação dos conjuntos de colheita

## **2 CAPÍTULO I: MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM DE PLANTA INTEIRA: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DESEMPENHO OPERACIONAL**

### **2.1 RESUMO**

O processo mecanizado de colheita da planta inteira para silagem deve ser feito buscando-se a otimização do combustível e do tempo trabalhado. Assim, objetivou-se avaliar a eficiência energética de máquinas de colheita de planta inteira para silagem, sendo de linha única e de área total, com o uso ou não de transbordo de apoio. O delineamento adotado foi em blocos, constituído de três tratamentos: colhedora de forragem de linha única, colhedora de forragem de área total e colhedora de forragem de área total com transbordo de apoio, com sete repetições, totalizando 21 unidades experimentais. Os tratores foram instrumentados com sensores que mensuraram a rotação do motor, velocidade operacional e consumo horário de combustível, possibilitando o cálculo da capacidade de campo operacional, consumo de combustível por área e por massa colhida, além da capacidade de produção dos conjuntos. Os resultados foram submetidos a análise de variância e posteriormente ao Teste de Tukey. O conjunto de linha única teve maior velocidade de deslocamento e menor consumo horário de combustível, porém com área trabalhada por tempo inferior, resultando menos material processado com maior gasto energético por massa colhida. A utilização do conjunto com transbordo e a colhedora frontal, possibilitou maior velocidade de deslocamento, com incremento na área trabalhada e no processamento de material, não diferindo em gasto de combustível por massa colhida mesmo com o uso de mais um trator no apoio da colheita.

Palavras-chave: Ensilagem; Zea mays L.; Produtividade; Forragem conservada; Consumo de combustível

### **2.2 ABSTRACT**

The mechanized process of harvesting the entire plant for silage must be done seeking to optimize the fuel and time worked. Thus, the objective was to evaluate the energy efficiency of whole-plant harvesting machines for silage, with a single row and total area, with or without the use of support overflow. The design adopted was in blocks, consisting of three treatments: single-row forage harvester, total area forage harvester and full area forage harvester with support overflow, with seven replications, totaling 21 experimental units. The tractors were instrumented with sensors that measured engine speed, operating speed and hourly fuel consumption, enabling the calculation of operational field capacity, fuel consumption by area and by harvested mass, in addition to the production capacity of the sets. The results were submitted to analysis of variance and later to Tukey's test. The single-line set had greater travel speed and less hourly fuel consumption, but with a shorter working area, resulting in less processed material with greater energy expenditure per harvested mass. The use of the set with transshipment and the front harvester allowed greater travel speed, with an increase in the area worked and in the processing of material, not differing in fuel expenditure per harvested mass even with the use of another tractor to support the harvest.

Keywords: Ensilage; Zea mays L.; Productivity; Preserved forage; Fuel consumption.

## 2.3 INTRODUÇÃO

A ensilagem é definida como o processo que engloba a colheita e o armazenamento de forragem úmida, cereais ou seus subprodutos, com posterior fermentação, dando origem a silagem, que é utilizada na alimentação animal como fonte conservada de nutrientes. Sua produção é largamente destinada à dieta de ruminantes de alto rendimento e produção, e como alimento suplementar em épocas de baixa disponibilidade de pastagem (WILKINSON E RINNE, 2018).

O milho (*Zea mays* L.), principal cultura utilizada para produção de silagem de planta inteira, deve ser colhido quando o percentual de matéria seca atingir de 30 a 35%, visando obter uma silagem de melhor qualidade (FERRARETO et al., 2018). Aliado a este fator, o tempo de enchimento do silo torna-se primordial, a fim de reduzir o período de exposição ao ambiente externo, mitigando a oxidação e preservando os açúcares da planta, promovendo a correta fermentação do material (MILLS E KUNG, 2002).

A distribuição do tamanho da partícula é parte importante da formulação na alimentação animal. Zebelli et al., (2012) ressalta que o tamanho de partícula adequado, melhora a função ruminal, levando a aumento na produção de micróbios ruminais, com degradação mais eficiente da fibra e aumento do teor de gordura do leite.

O modelo atual de agricultura, requer que o produtor rural otimize o uso de insumos nas áreas de cultivo visando a redução nos custos de produção, que pode ser alcançado através da adoção de novas tecnologias (KASSIE et al, 2017; FEITOSA et al, 2018). Desta forma, o planejamento das operações agrícolas é fundamental, principalmente no que tange a capacidade de campo efetiva das máquinas em cada operação na propriedade (TOLEDO et al, 2010).

A logística adequada do processo de ensilagem é fator essencial para o sucesso, reunindo operações de colheita, transporte e compactação do silo, que ocorrem simultaneamente (BUSATO et al, 2019). Desta forma, a escolha adequada dos conjuntos de colheita (trator + implemento) deve ser baseada na eficiência de

campo, não só promovendo aumento na capacidade produtiva, mas também redução no consumo de combustível e de gases poluentes, tornando o processo mais sustentável. (ARALDI et al., 2013; LOVARELLI et al., 2018)

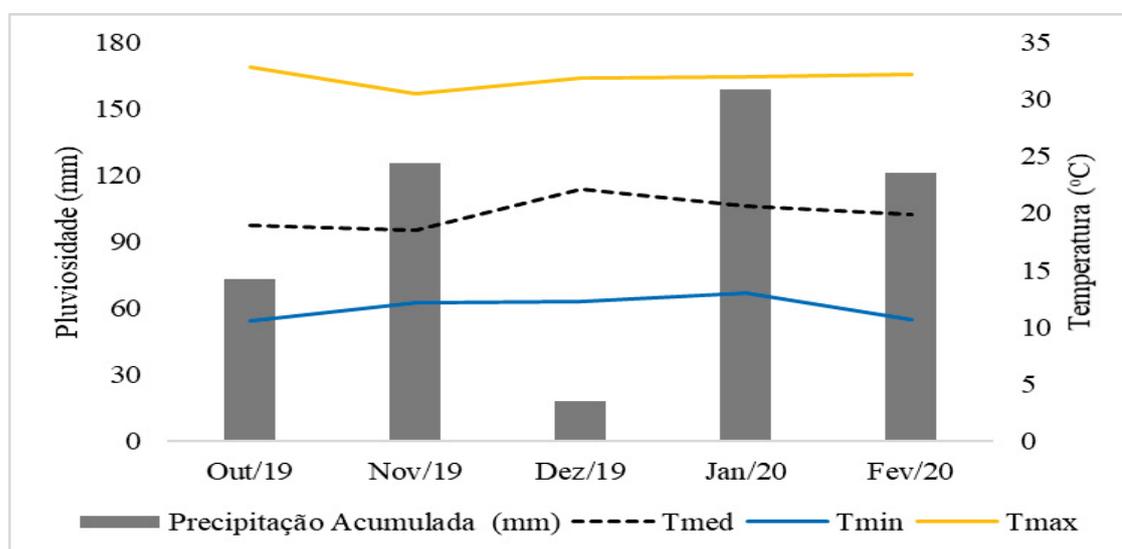
Devido a necessidade de otimizar a colheita de planta inteira para silagem buscando-se o maior rendimento operacional, este capítulo teve como objetivo avaliar a eficiência energética de duas máquinas de colheita de planta inteira para silagem, de linha única e de área total, sendo esta última com o uso ou não de transbordo de apoio.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi desenvolvido na Fazenda Canguiri, localizada em Pinhais-PR, Brasil, em Área de Preservação Ambiental (APA), próximo as coordenadas centrais 7189983.01 de latitude e 688066.38 de longitude, Fuso 22J, Datum WGS84. De acordo com a classificação climática de Köppen o clima é do tipo Cfb (clima oceânico temperado) com temperatura média de 22°C (ALVARES et al., 2014). Os dados de temperatura do ar média, mínima e máxima, bem como a precipitação acumulada ao longo do período do experimento foram coletadas com uma estação meteorológica automática localizada próxima ao campo experimental (FIGURA 1)

FIGURA 1 - TEMPERATURA MÉDIA (Tmed), MÍNIMA (Tmin) E MÁXIMA (Tmax) DO AR E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DURANTE OS ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO DO MILHO



Fonte: O autor (2021)

A área experimental de 2,0 ha ( Figura 2) foi semeada na segunda quinzena de outubro com a Híbrido Biomatrix BM950PR03 em espaçamento de 0,8 m entre linhas e população de 54,6 mil plantas por hectare. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-amarelo álico, com declividade de 5% no sentido de cultivo, com preparo convencional de solo (uma gradagem intermediária e uma gradagem niveladora em sequência). A adubação de base foi de 350 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 08-20-20 e adubação de cobertura com 400 de kg ha<sup>-1</sup> de ureia (46% de nitrogênio) aplicada 45 dias após a semeadura, não sendo realizado controle com produtos fitossanitários ao longo do cultivo.

FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI - PR



Datum SIRGAS 2000, Projeção UTM 22S. Fonte: O autor (2021)

#### 2.4.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

A execução do experimento foi realizada com o processamento da planta inteira de milho para silagem, realizada 120 dias após a semeadura.

Para o processamento da ensilagem, foram utilizadas duas colhedoras de forragem: a primeira composta por linha única de colheita lateral, modelo JF C120; a segunda de área total e colheita frontal modelo JF 2000 AT. Ambas as máquinas

com doze facas de corte, reguladas para o corte de partícula de  $4 \times 10^{-3}$  m, não equipadas com quebrador de grãos e realizando a colheita no sentido de cultivo da cultura.

Foram utilizados dois tratores, um Case Farmall 80 e um New Holland T6 130, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1. Com estes tratores, dois conjuntos trator-forrageira foram formados: A) a colhedora JF C120 e o trator Farmall 80, e B) a colhedora JF 2000 AT com o trator New Holland T6 130.

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS TRATORES DOS CONJUNTOS A E B

Trator	Case Farmall 80		New Holland T6 130	
Potência Nominal ISO TR 14396 (kW / HP)	59 / 80		97 / 132	
Tipo de Tração	4x2 TDA*			
Índice de Antecipação (%)	2.37		3.02	
	Pneu Dianteiro	Pneu Traseiro	Pneu Dianteiro	Pneu Traseiro
Tipo de Pneu	Goodyear 12.4–24	Goodyear 18.4–30	Goodyear 14.9–28	Pirelli 18.4–38
Pressão de Insuflagem (kPa)	137	110	220	110

\*TDA – Tração Dianteira Auxiliar.

A carga estática dos conjuntos (Tabela 2), e a distribuição de massa nos eixos, com os equipamentos de colheita na posição de trabalho, foi determinada com balança CELMIG, modelo CM-1002, composta por quatro sapatas.

TABELA 2 –QUANTIDADE DE LASTRO SÓLIDO, DISTRIBUIÇÃO DE MASSA SOBRE O EIXO E MASSA TOTAL DOS CONJUNTOS A E B

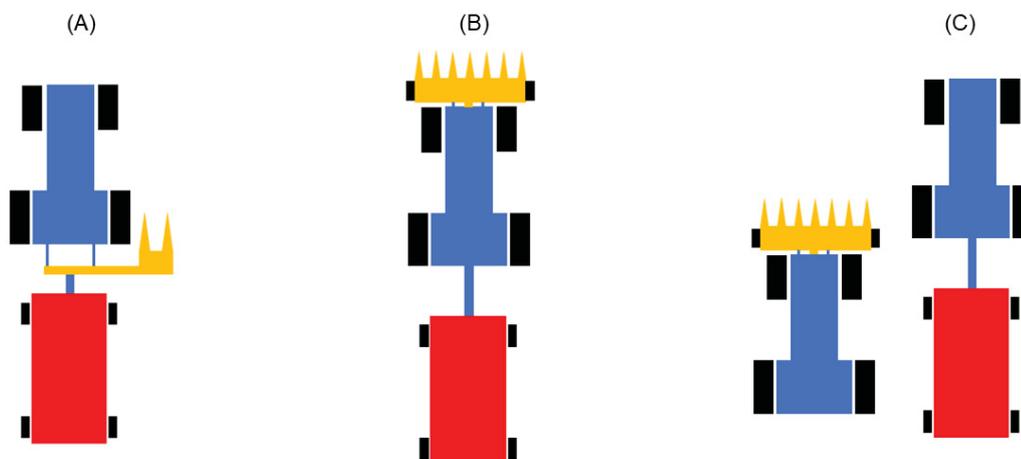
	Lastro sólido adicionado - kg		Massa no Eixo – kg (%)		Massa Total - kg
	Dianteira	Traseira	Eixo Dianteiro	Eixo Traseiro	
Conjunto A	180	100	1.484 (34)	2.884 (66)	4.368
Conjunto B	-	920	5.730 (69)	2.575 (31)	8.305

Para o trator do conjunto A, foi adotado marcha GII M1, com rotação no motor de 2.100 RPM, visando garantir 540 RPM na Tomada de Potência (TDP) traseira e velocidade teórica de  $1,16 \text{ m s}^{-1}$ . No trator do conjunto B foi utilizada a marcha GI M1L e rotação no motor de 2.200 RPM para garantir 1.000 RPM na TDP dianteira e velocidade teórica de  $0,86 \text{ m s}^{-1}$ . Ambos os tratores estavam com os tanques de combustível completos e tração dianteira auxiliar (TDA) acionada durante o experimento.

O arranjo experimental adotado para a análise energética foi em blocos, consistindo em três tratamentos (modalidades de colheita):  $T_{LU}$ ) colhedora de forragem de linha única;  $T_{AT}$ ) colhedora de forragem de área total; e  $T_{ATT}$ ) colhedora de área total com conjunto de transbordo de apoio. Foram realizadas sete repetições, cada qual consistindo na distância de 20 m de coleta de dados, totalizando 21 unidades experimentais.

Os tratamentos denominados  $T_{LU}$  e  $T_{AT}$ , consistiram na colheita realizada pelo Conjunto A e B respectivamente, em que, para o escoamento do material colhido foi acoplado na barra de tração do trator uma carreta de volume  $13 \text{ m}^3$  (FIGURA 3A e 3B). Após o enchimento, interrompia-se a colheita, e fazia-se o desacoplamento da barra de tração e substituição por outra de mesma dimensão. Para o tratamento  $T_{ATT}$ , foi utilizado o Conjunto B, realizando o escoamento do material sem interrupção, em carreta de volume  $13 \text{ m}^3$  no sistema de transbordo, a qual foi acoplada a barra de tração de trator de 57 kW (78 cv) formando o conjunto de apoio (trator + carreta) (FIGURA 3C). O conjunto de apoio deslocava-se na forma de transbordo, lateralmente ao Conjunto B, e quando a carga era completada, havia a substituição por outro conjunto de apoio de mesma dimensão, sem interrupção na colheita.

FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MODALIDADES DE COLHEITA  $T_{LU}$  (A),  $T_{AT}$  (B) E  $T_{ATT}$  (C)



Fonte: O autor (2021)

#### 2.4.3 PARÂMETROS AVALIADOS PARA A ANÁLISE ENERGÉTICA

Os tratores dos conjuntos A e B foram instrumentados com os sensores descritos abaixo, conectados ao sistema de aquisição de dados (SAD) de placa de circuito impresso (JASPER et al., 2017), com frequência de aquisição de 1 Hz.

A rotação do motor (RM) foi obtida através da leitura do conector “W” dos alternadores dos tratores, através do canal digital no SAD. Para o trator Farmall 80 (Conjunto A) a equação linear com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 99% indicou que cada pulso representava 4,04 RPM e o trator modelo T6 130 (Conjunto B) cada pulso resultava 3,65 RPM, com  $R^2$  superior a 99%.

A velocidade operacional (VO) foi determinada com o uso de sensor de velocidade Agrosystem modelo SVA-60, utilizando-se o número de pulsos emitidos (1 pulso =  $0,016 \text{ m s}^{-1}$  –  $R^2$  99%) pelo sensor durante a realização do experimento.

O consumo horário de combustível (CHC) foi mensurado utilizando-se dois fluxômetros FLOWMATE OVAL MIII LSF41, instalados no sistema de alimentação de combustível dos tratores (entrada e retorno a tanque). O consumo foi dado pela diferença no número de pulsos entre os fluxômetros, convertidos posteriormente em

volume (1 pulso equivalente a 1 cm<sup>3</sup>). Este parâmetro foi mensurado em todos os tratores utilizados no experimento, incluindo o trator utilizado como transbordo no T<sub>ATT</sub>. Ressalta-se que para o tratamento T<sub>ATT</sub>, o valor de CHC foi obtido a partir da soma dos consumos horários do conjunto B e do conjunto de transbordo

A eficiência da operação (EF) foi determinada com base na metodologia proposta por Miahle (1974) e ASABE EP 496.3 (2011), por meio de monitoramento do tempo gasto na atividade de colheita da ensilagem: operação de colheita, troca de carreta, manobras de cabeceiras, afiação de facas e manutenção. O valor calculado e adotado no experimento foi de 72% para o T<sub>LU</sub>, 79% para o T<sub>AT</sub> e 85% para o T<sub>ATT</sub>.

A capacidade de campo operacional (CCO), foi calculada conforme a Eq. 1

$$CCO = \frac{VO \times LT \times EF}{10} \quad (1)$$

em que,

CCO – Capacidade de Campo Operacional, ha h<sup>-1</sup>

LT – Largura de Trabalho, m

Adotou-se, para o conjunto A o valor de LT de 0,8 m e para o Conjunto B, a LT de 2,4 metros.

O consumo de combustível por área trabalhada (CCA), pode ser calculado pela razão entre consumo horário e da capacidade de campo operacional, de acordo com a Eq. 2

$$CCA = \frac{CHC}{CCO} \quad (2)$$

em que,

CCA – Consumo de combustível por área trabalhada, L ha<sup>-1</sup>

A quantidade de combustível utilizada por massa de silagem colhida (CCT), foi obtida através do cálculo realizado conforme a Eq. 3

$$CCT = CCA \times P \quad (3)$$

em que,

CCT – Consumo de combustível por massa colhida, L Mg<sup>-1</sup>

P – Produtividade média da lavoura, Mg

A produtividade média da lavoura (P) foi de 28,6 Mg ha<sup>-1</sup> de massa úmida na colheita do Conjunto A e de 34,31 Mg ha<sup>-1</sup> para o Conjunto B, valores estes mensurados após a colheita de cada parcela, com o uso das balanças de sapatas descritas anteriormente.

A capacidade de produção do conjunto (CPC), foi determinada conforme a Eq. 4

$$CPC = CCO \times P \quad (4)$$

em que,

CPC – Capacidade de produção do conjunto, Mg h<sup>-1</sup>

#### 2.4.4 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COLHIDO

Após a colheita de cada conjunto, foram coletadas amostras do material em cada carreta, para a análise do tamanho de partículas e da massa seca. Tais amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, alocadas em caixa térmica e posteriormente levadas ao laboratório de adequação de tratores agrícolas (LATA-UFPR), onde se procedeu as análises. O delineamento adotado foi em blocos, consistindo em dois tratamentos (Conjunto A e Conjunto B) e cinco repetições, totalizando 10 unidades amostrais.

O tamanho de partículas foi analisado utilizando o separador de partículas de Penn State. Este método consiste na agitação horizontal de amostras por uma série de peneiras de 19 e 8 mm além de uma bandeja. Para tanto, cinco repetições de 300 g das amostras coletadas foram colocadas sobre a peneira superior e agitadas de forma sistematizada com oito séries de cinco agitações vigorosas, sendo que a cada cinco agitações o conjunto de peneiras era rotacionado 90°, totalizando 40 movimentos. A quantidade de material retido em cada peneira teve sua massa mensurada através de balança semi-analítica com resolução de 10<sup>-2</sup> g, e calculada a porcentagem em relação a massa total da amostra.

Para se obter a matéria seca do material colhido, as amostras coletadas tiveram suas massas mensuradas com balança de precisão, e levadas a estufa,

onde permaneceram a temperatura de 105°C até obtenção de massa constante. Em posse destes valores, foi calculado a matéria seca (MS) conforme a Eq. 5

$$MS = \frac{(C - A)}{(B - A)} \times 100 \quad (5)$$

em que,

MS – Matéria seca, %

C – Massa da amostra seca, g

A – Massa do recipiente utilizado, g

B – Massa da amostra fresca, g

Na Tabela 3 constam a caracterização do material colhido pelos conjuntos A e B.

TABELA 3 – MÉDIAS DA DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE PARTICULA E MATÉRIA SECA DO MATERIAL COLHIDO PELOS CONJUNTOS A E B

	Tamanho de Partícula (%)			Matéria Seca (%)
	> 19 mm	8 a 19 mm	< 8 mm	
Conjunto A	6,88	43,30 B	48,73 A	34,58
Conjunto B	6,39	65,82 A	26,85 B	32,58

Todos os dados coletados foram avaliados quanto a normalidade, pelo coeficiente de curtose e assimetria. Atendidas as pressuposições, submeteu-se a análise de variância (ANOVA), e quando significativo ao teste Tukey.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão apontados os resultados da análise de variância e do teste de médias para as variáveis de análise energética avaliadas. Os parâmetros avaliados exibiram distribuição normal, pois de acordo com Montgomery (2004), quando os coeficientes de assimetria e curtose estão na faixa de -2 a 2, os dados podem ser considerados normais. O coeficiente de variação obtido foi categorizado como estável, de acordo com a classificação de Ferreira (2018).

TABELA 4 - SÍNTESE DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE MÉDIAS PARA AS VARIÁVEIS ANALISADAS

Tratamento	RM (RPM)	VO (m s <sup>-1</sup> )	CHC (L h <sup>-1</sup> )	CCO (ha h <sup>-1</sup> )	CCA (L ha <sup>-1</sup> )	CCT (L Mg <sup>-1</sup> )	CPC (Mg h <sup>-1</sup> )
T <sub>LU</sub>	2.091 B	1,01 A	9,95 C	0,21 C	47,46	1,66 A	6,02 C
T <sub>AT</sub>	2.224 A	0,73 C	24,82 B	0,50 B	49,67	1,45 AB	17,30 B
T <sub>ATT</sub>	2.231 A	0,84 B	28,94 A	0,61 A	47,14	1,37 B	21,08 A
Teste F	182,73**	64,74**	400,72**	318,04**	0,41 <sup>NS</sup>	4,29*	375,01**
DMS	21,91	0,23	1,88	0,04	8,17	12,50	1,53
CV (%)	0,70	5,29	6,21	7,00	11,91	0,27	7,23
Curtose (%)	-1,59	-1,13	-1,48	-1,63	-0,05	-0,07	-1,62
Assimetria (%)	-0,65	-0,04	-0,58	-0,47	0,50	1,04	-0,52

Tratamentos: T<sub>LU</sub>: colheita com Conjunto A; T<sub>AT</sub>: colheita com Conjunto B; T<sub>ATT</sub>: colheita com o Conjunto B + conjunto de apoio. Parâmetros: Rotação do motor (RM), Velocidade operacional (VO), Consumo horário de combustível (CHC), Capacidade de campo operacional (CCO), Consumo de combustível por área trabalhada (CCA), Consumo de combustível por massa colhida (CCT) e Capacidade de produção do conjunto (CPC). Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo "Teste Tukey" (P < 0,05). Teste F da análise de variância (ANOVA): <sup>NS</sup> – Não significativo, \* (P < 0,05) e \*\* (P < 0,01); DMS: Diferença mínima significativa do teste de médias; CV %: Coeficiente de variação.

Os resultados descritos na Tabela 3 apresentaram diferenças significativas para os parâmetros RM, VO, CHC, CCO, CCT e CPC; não diferindo apenas no parâmetro CCA, dentre os tratamentos avaliados.

Para Roeber et al. (2017), a tomada de força do trator (TDP) é o principal mecanismo de acoplamento para transmissão de energia provinda do motor para o implemento, e ainda muito utilizada devido aos altos valores de eficiência obtidos

nesta forma de transmissão, podendo alcançar 90% conforme ASABE D497.7 (2015). As variações na rotação do motor podem interferir no correto funcionamento do implemento, uma vez que a relação de transmissão entre o motor e a TDP é feita através de engrenagens, além de que maiores rotações no motor promovem maior torque disponibilizado na TDP (KIM et al., 2013).

A VO foi superior para o  $T_{LU}$ , tratamento no qual se utilizou a colhedora de forragem de linha única (conjunto A). Todavia, quando analisado a colhedora do conjunto B, o  $T_{ATT}$  apresentou 15% de incremento na velocidade de deslocamento em relação ao  $T_{AT}$ , devido a demanda energética necessária para tração da carreta ter sido transferido ao trator de apoio, possibilitando ao trator do conjunto B disponibilizar maior energia para o deslocamento e processamento de material no  $T_{ATT}$ . Resultado comprovado por Simick et al (2014), que em estudo com diferentes forças na barra de tração, conclui que a força tracionada na barra de tração influi de maneira inversamente proporcional na velocidade de deslocamento.

O consumo de combustível na etapa de colheita, segundo Tieppo et al (2019), tem relação direta com a taxa de alimentação (*feed rate*) e o tipo de material que está sendo processado. A variável CHC foi menor no tratamento  $T_{LU}$ , que utilizou o Conjunto A que possuía trator de menor potência e menor massa em relação ao Conjunto B. Resultado semelhante encontrado por Tavares et al (2017) em estudo com trator da mesma faixa de potência do conjunto A com implemento acoplado a TDP. Para os outros tratamentos, que utilizaram o conjunto B, nota-se que no tratamento  $T_{ATT}$  que contabilizou o consumo de combustível do trator acoplado a colhedora e do conjunto transbordo, o valor foi 16,6% superior em comparação ao  $T_{AT}$ , cujo próprio trator do conjunto tracionou a carreta.

A CCO teve menor resultado para o  $T_{LU}$ , que mesmo apresentando maior VO, apresentava menor largura de trabalho, refletindo na menor média de CCO entre os tratamentos, resultado semelhante encontrado por Farias et al (2018). O tratamento  $T_{ATT}$  foi 22% superior ao  $T_{AT}$ , resultado da maior velocidade de deslocamento e da maior eficiência obtida na operação devido ao uso do conjunto de transbordo, e por consequência o tempo de interrupção na colheita ser menor. O uso do conjunto do  $T_{ATT}$ , se mostrou quase três vezes superior ao  $T_{LU}$  na CCO, devido a maior largura de trabalho, proporcionando aumento da área trabalhada em menor tempo (MARTINS et al., 2018). Mahl et al. (2004) comprova que o aumento

na velocidade de deslocamento do conjunto promove incremento na capacidade de campo, podendo acarretar redução no consumo operacional.

Para Sarauskis et al. (2017) o consumo de combustível por área trabalhada permite comparar de maneira mais assertiva as operações agrícolas em diferentes cultivos e independente da largura de trabalho do implemento. No presente experimento não houve diferença estatística significativa para o parâmetro CCA, demonstrando que todos os tratamentos apresentam similaridade no gasto de combustível por área trabalhada.

A variável consumo de combustível por massa colhida (CCT) não obteve diferença estatística entre os tratamentos  $T_{LU}$  e  $T_{AT}$ , ou seja, o gasto energético por massa de planta colhida utilizando o equipamento de linha única (Conjunto A) e o de área total (Conjunto B) quando ambos tracionam a carreta é semelhante. Os tratamentos  $T_{AT}$  e  $T_{ATT}$  também não apresentaram diferença significativa entre si, mesmo com a utilização extra de trator específico para o conjunto de transbordo. Porém, o gasto de combustível por massa colhida no  $T_{ATT}$  foi 17,4% menor em relação ao  $T_{LU}$ , demonstrando que o uso de equipamentos maiores, com maior capacidade produtiva, promove melhor eficiência no uso de combustível.

Os valores de capacidade de produção do conjunto (CPC) foram superiores no tratamento  $T_{ATT}$ , em razão da maior largura de trabalho e da maior velocidade de deslocamento. Ramos et al (2016) ressalta que o incremento na velocidade de deslocamento acarreta maior capacidade de colheita do conjunto. No presente trabalho, a utilização de transbordo no conjunto de apoio permitiu 21,8% de aumento na capacidade manipulação de material, ou seja, processamento da planta inteira de milho.

## 2.6 CONCLUSÕES

Nas condições em que o presente trabalho foi realizado, é possível concluir que:

- O uso de conjuntos com maiores larguras de trabalho, mesmo trafegando em velocidades de deslocamento menores, promove a colheita de maiores áreas e material processado pelo tempo, sem variação significativa no consumo de combustível por área e menor gasto energético por material colhido.

- O uso de conjuntos com transbordo aumenta a área trabalhada e favorece o menor consumo de combustível por quantidade de massa e produção.

## 2.7 REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22: 711–729, 2014.

ARALDI, P.F. et al. Operational efficiency in mechanized harvesting in irrigated rice fields. **Ciência Rural**, 43 (3): 445–451, 2013.

ASABE American Society of Agricultural Biological Engineers. ASABE EP 496.3: Agricultural machinery management data. In: \_\_\_\_\_. **ASABE Standards 2011: standards engineering practices data**. St. Joseph, 2011. 6 p.

ASABE American Society of Agricultural Biological Engineers. ASABE D497.7: Agricultural machinery management data. In: \_\_\_\_\_. **ASABE Standards: standards engineering practices data**. St. Joseph, 2015. 9 p.

BAL, M.A. et al. Crop processing and chop length of corn silage: effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 83, p. 1264-1273, 2000.

BRÜNING, D. et al. Effect of compaction, delayed sealing and aerobic exposure on maize silage quality and on formation of volatile organic compounds. **Grass and Forage Science**, 73 (1): 53–66, 2017.

BUSATO, P. et al. Optimisation tool for logistics operations in silage production. **Biosystems Engineering**, 180: 146–160, 2019.

FARIAS, M. et al. Desempenho operacional e energético de um trator agrícola durante operação de gradagem. **Tecno-Lógica**, 22 (2): 213–216, 2018.

FEITOSA, E.O. et al. Analysis of costs and profitability in irrigated papaya production in semiarid. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 12: 2293–2304, 2018.

FERRARETTO, L.F.; SHAVER, R. D.; LUCK, B. D. Silage review: Recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting. **Journal of Dairy Science**, 101 (5): 3937–3951, 2018.

FERREIRA, P.V. **Estatística experimental aplicada as ciências agrárias**. Viçosa: UFV, 2018, 126 p.

HE, P. et al. Reducing agricultural fuel consumption by minimizing inefficiencies. **Journal of Cleaner Production**, 236: 1-13, 2019.

JASPER, S.P. et al. Tractor performance of power 157 kW on condition manual and automatic gears of management. **Scientia Agraria**, 17 (3): 55–60, 2016.

KASSIE, M. et al. Measuring farm and market level economic impacts of improved maize production technologies in Ethiopia: Evidence from panel data. **Journal of Agricultural Economics**, 69 (1): 76–95, 2017.

KIM, Y.-J.; CHUNG, S.-O.; CHOI, C.-H.; Effects of gear selection of an agricultural tractor on transmission and PTO load during rotary tillage. **Soil and Tillage Research**, 134: 90–96, 2013.

LOVARELLI, D.; FIALA, M.; LARSSON, G.; Fuel consumption and exhaust emissions during on-field tractor activity: A possible improving strategy for the environmental load of agricultural mechanization. **Computers and Electronics in Agriculture**, 151: 238–248, 2018.

MAHL, D. et al. Seeder energetic demand and distribution efficiency of corn seeds under speed variation and soil condition. **Engenharia Agrícola**, 24 (1): 150–157, 2004.

MARTINS, M.B. et al. Energy optimization of an agricultural tractor using technical standards in harrowing operations. **Engenharia na Agricultura**, 26 (1): 52–57, 2018.

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Editora Ceres, 1974, 301 p.

MILLS, J.A.; KUNG JR., L. The effect of delayed ensiling and application of a propionic acid-based additive on the fermentation of barley silage. **Journal of Dairy Science**, 85 (8): 1969–1975, 2002.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 532 p.

RAMOS, C.R.G. et al. Fuel consumption of a sugarcane harvester in different operational settings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 20 (6): 588–592, 2016.

ROEBER, J.B. et al. Tractor power take-off torque measurement and data acquisition system. **Applied Engineering in Agriculture**, 33 (5): 679–686, 2017.

SAH, R. P.; TIWANA, U. S.; KUMAR, B.; Evaluation of normal and specialty corn for fodder yield and quality traits. **Range Management and Agroforestry**, v.37, p. 79-83, 2016

SIMIKIC, M. et al. Power delivery efficiency of a wheeled tractor at oblique drawbar force. **Soil and Tillage Research**, 141: 32–43, 2014.

TAVARES, T. de O. et al. Effective power and hourly fuel consumption demanded by set tractor-coffee harvester in function of adequacy tractor ballasting. **Engenharia Agrícola**, 37 (4): 699–708, 2017.

THOMSON, A. L. et al. The effect of varying proportion and chop length of lucerne silage in a maize silage-based total mixed ration on diet digestibility and milk yield in dairy cattle. **Animal**, v. 11, p. 2211-2219, 2017

TIEPPO, R.C. et al. Modeling cost and energy demand in agricultural machinery fleets for soybean and maize cultivated using a no-tillage system. **Computers and Electronics in Agriculture**, 156: 282–292, 2019.

TOLEDO, A. de et al. Spatial behavior of energetic demand in peanut sowing in latosol under conventional tillage. **Engenharia Agricola**, 30 (3): 459–467, 2010.

WILKINSON, J.M.; RINNE, M. Highlights of progress in silage conservation and future perspectives. **Grass and Forage Science**, 73 (1): 40–52, 2018.

ZEBELI, Q. et al. DROCHNER, W. Review: role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 95, p. 1041-1056, 2012

### 3 CAPÍTULO II: ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO SUBMETIDOS A MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM DE PLANTA INTEIRA

#### 3.1 RESUMO

A avaliação dos atributos físicos do solo em áreas de cultivo é importante para o entendimento dos impactos das atividades agropecuárias, sendo o tráfego de máquinas seu principal causador. Desta forma, objetivou-se avaliar os atributos físicos do solo na colheita de silagem, ocasionados por duas máquinas de colheita de planta inteira, de linha única e de área total, com o uso ou não de transbordo de apoio. O arranjo experimental adotado foi em blocos, constituído de três tratamentos: colhedora de forragem de linha única, colhedora de forragem de área total e colhedora de forragem de área total com transbordo de apoio, sendo cada parcela do experimento uma faixa de 200 m. Antes do início da colheita, e vinte e quatro horas após o processamento da ensilagem foram coletadas amostras indeformadas de solo nas camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4m para determinação de micro, macro e porosidade total, densidade do solo e umidade volumétrica. Vinte quatro horas após a colheita da silagem, coletou-se com uso de penetrometro a resistência do solo a penetração na camada de 0-0,4m. Os resultados obtidos foram analisados estabelecendo-se o intervalo de confiança pelo teste T a 10% de probabilidade. Na camada de 0-0,2 m a macroporosidade, e porosidade total foram inferiores nas três modalidades de colheita, não diferindo entre si, enquanto não houve diferença significativa na microporosidade. Resultado similar foi observado na camada de 0,2-0,4m com exceção da porosidade total no tratamento com a colhedora de área total sem o conjunto de transbordo, o qual não diferiu do momento prévio a colheita. A umidade volumétrica na camada 0-0,2m não obteve diferença significativa, porém na maior profundidade avaliada os tratamentos com linha única e área total sem transbordo tiveram umidade levemente superior ao momento prévio, fato que não correu com a colhedora de área total com transbordo. Na camada superficial, a densidade do solo ( $D_s$ ) no conjunto com linha única não diferiu do momento prévio a colheita e das demais modalidades, entretanto o conjunto com área total apresentou incremento significativo na  $D_s$ . Na camada subsuperficial, os tratamentos com a colhedora de linha única e a de área total com o uso de transbordo não diferiram do momento prévio a colheita. A resistência do solo a penetração (RSP) foi influenciada pelas modalidades de colheita principalmente nos primeiros 0,15 m de profundidade sendo mais notável no uso do conjunto de área total, e a partir dos 0,2 m até a profundidade máxima avaliada não diferiram entre si e da entrelinha da passagem do rodado. Os dois conjuntos de colheita utilizados não diferem entre si na redução de porosidade do solo em todas as camadas e na RSP a partir de 0,15m, porém o maior conjunto de colheita aumenta a  $D_s$ .

Palavras-chave: *Zea mays*, porosidade do solo, resistência a penetração do solo, umidade do solo, preparo convencional

### 3.2 ABSTRACT

The evaluation of the physical attributes of the soil in cultivated areas is important to understand the impacts of agricultural activities, with machine traffic being its main cause. Thus, the objective was to evaluate the physical attributes of the soil in the silage harvest, caused by two whole-plant, single-row, full-area harvesting machines, with or without the use of support overflow. The experimental arrangement adopted was in blocks, consisting of three treatments: single-line forage harvester, total area forage harvester and total area forage harvester with support overflow, with each experimental plot being a 200 m strip. Before the beginning of the harvest, and twenty-four hours after the silage processing, undisturbed soil samples were collected in the layers of 0-0.2 m and 0.2-0.4 m for determination of micro, macro and total porosity, density of the soil and volumetric moisture. Twenty-four hours after harvesting the silage, the soil resistance to penetration in the 0-0.4m layer was collected using a penetrometer. The results obtained were analyzed by establishing the confidence interval using the T test at 10% probability. In the 0-0.2 m layer, macroporosity and total porosity were lower in the three harvesting modalities, not differing from each other, while there was no significant difference in microporosity. A similar result was observed in the 0.2-0.4m layer, except for the total porosity in the treatment with the full area harvester without the overflow set, which did not differ from the moment prior to harvest. The volumetric humidity in the 0-0.2m layer did not show a significant difference, but at the greatest depth evaluated, the treatments with single line and total area without overflow had slightly higher humidity than the previous moment, which did not happen with the total area harvester with overflow. In the superficial layer, the density of the soil ( $D_s$ ) in the set with a single row did not differ from the moment prior to harvest and from the other modalities, however the set with total area showed a significant increase in the  $D_s$ . In the subsurface layer, the treatments with the single-row harvester and the total area with the use of overflow did not differ from the time prior to harvest. The soil resistance to penetration (RSP) was influenced by the harvesting modalities, mainly in the first 0.15 m of depth, being more remarkable in the use of the total area set, and from 0.2 m to the maximum depth evaluated, they did not differ between each other and between the lines of the wheelset passage. The two harvest sets used do not differ from each other in the reduction of soil porosity in all layers and in the RSP from 0.15m onwards, but the largest harvest set increases the  $D_s$ .

Keywords: *Zea mays*, soil porosity, soil resistance to penetration, soil moisture, conventional tillage

### 3.3 INTRODUÇÃO

A presença de uma estação seca bem definida no Brasil, gera uma redução significativa na disponibilidade e qualidade das pastagens, o que acarreta prejuízos diretos na produção animal. Buscando amenizar este problema, o produtor rural

procura fontes de alimentos alternativos para disponibilizar aos animais, como é o caso da silagem (BARCELOS et al., 2018).

Para o bom desenvolvimento da cultura de interesse para silagem, é importante que além dos cuidados com a fertilidade, deve-se ter condições físicas do solo apropriadas durante a implantação e ao longo do crescimento da cultura, evitando-se assim sua degradação (CORTEZ et al., 2018).

Os cultivos que objetivam silagem em grande parte das vezes são feitos sempre nas mesmas áreas, havendo assim precária reposição de matéria orgânica sobre a superfície causando problemas na ciclagem de nutrientes e na conservação de solo, aliadas ao fato que são áreas com intenso tráfego de máquinas agrícolas nas operações de semeadura, manejo e colheita (NAGAHAMA et al., 2016). Francetto et al. (2014) relata que a intensidade de tráfego de máquinas nas áreas de produção agrícola é o grande responsável pelas mudanças nos atributos físicos do solo, citando principalmente o aumento da densidade e da resistência a penetração, bem como da redução da porosidade total, tornando assim o solo um meio restritivo ao crescimento e desenvolvimento radicular das culturas.

Buscando elevar o rendimento operacional e a eficiência no uso de combustíveis, as máquinas agrícolas receberam ao longo dos anos constantes pacotes tecnológicos, resultando no incremento das massas e da potência motora (CAVALLO et al. 2015; UNGUREANU et al, 2015). Todavia, o aumento da área de contato não acompanhou o aumento de massa, o que tem provocado maiores danos a estrutura física do solo.

A redução na porosidade, afeta a disponibilidade de água e ar para o sistema radicular, levando a redução na produtividade da cultura, além de interferir na biodiversidade do solo (YAHYA et al., 2015; LEES et al., 2016). Dependendo do grau de compactação do solo, é necessário realizar operações agrícolas mecanizadas, que envolvem gasto de combustível, impactando nos custos de produção e aumentando a emissão de gases de efeito estufa (TULLBERG, 2010).

Para Simeckova et al., (2021) a magnitude dos efeitos causados pelos equipamentos agrícolas nas propriedades físicas do solo depende da carga sobre o eixo, pressão de insuflagem do rodado, área de contato e teor de umidade do solo. E deve se levar em consideração também a densidade inicial do solo, a velocidade de deslocamento do equipamento e o número de passadas (FILIPOVIC et al., 2016; RENCIN et al., 2017).

A pressão média aplicada ao solo pelo rodado é determinada por meio da razão entre a carga vertical incidente sobre o rodado e a sua área de contato (MIALHE, 1980). Berisso et al., (2013) ressalta que a intensidade e a direção da tensão aplicada no solo devido ao tráfego de máquinas é o que determinará a deformação sofrida pelo solo, causando a redução no tamanho dos poros e a conectividade entre estes, ocasionando a redução na permeabilidade.

Portanto objetivou-se avaliar as propriedades físicas do solo durante a colheita de silagem, ocasionados por máquinas de colheita de planta inteira para silagem, de linha única e de área total, com o uso ou não de transbordo de apoio.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi desenvolvido na Fazenda Canguiri, localizada em Pinhais-PR, Brasil, em Área de Preservação Ambiental (APA), próximo as coordenadas centrais 7189983.01 de latitude e 688066.38 de longitude, Fuso 22J, Datum WGS84. De acordo com a classificação climática de Köppen o clima é do tipo Cfb (clima oceânico temperado) com temperatura média de 22°C (ALVARES et al., 2014).

A área experimental de 2,0 ha, (Figura 1) foi semeada na segunda quinzena de outubro com o Híbrido Biomatrix BM950PR03 em espaçamento de 0,8 m entre linhas e população de 54,6 mil plantas por hectare. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-amarelo álico, com declividade de 5% no sentido de cultivo, com preparo convencional de solo (uma gradagem intermediária e uma gradagem niveladora em sequência). A adubação de base foi de 350 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 08-20-20 e adubação de cobertura com 400 de kg ha<sup>-1</sup> de ureia (46% de nitrogênio) aplicada 45 dias após a semeadura, não sendo realizado controle com produtos fitossanitários ao longo do cultivo.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI - PR



Datum SIRGAS 2000, Projeção UTM 22S. Fonte: O autor (2021)

### 3.4.2 DESCRIÇÃO DOS CONJUNTOS DE COLHEITA UTILIZADOS

A execução do experimento foi realizada com o processamento da planta inteira de milho para silagem, realizada 120 dias após a semeadura.

Para o processamento da ensilagem, foram utilizadas duas colhedoras de forragem: a primeira composta por linha única de colheita lateral, modelo JF C120; a segunda de área total e colheita frontal modelo JF 2000 AT. Ambas as máquinas com doze facas de corte, reguladas para o corte de partícula de  $4 \times 10^{-3}$  m e não equipadas com quebrador de grãos.

Foram utilizados dois tratores, um Case Farmall 80 e um New Holland T6 130, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1. Com estes tratores, dois conjuntos trator-forrageira foram formados: A) a colhedora JF C120 e o trator Farmall 80, e B) a colhedora JF 2000 AT com o trator New Holland T6 130.

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS TRATORES DOS CONJUNTOS A E B

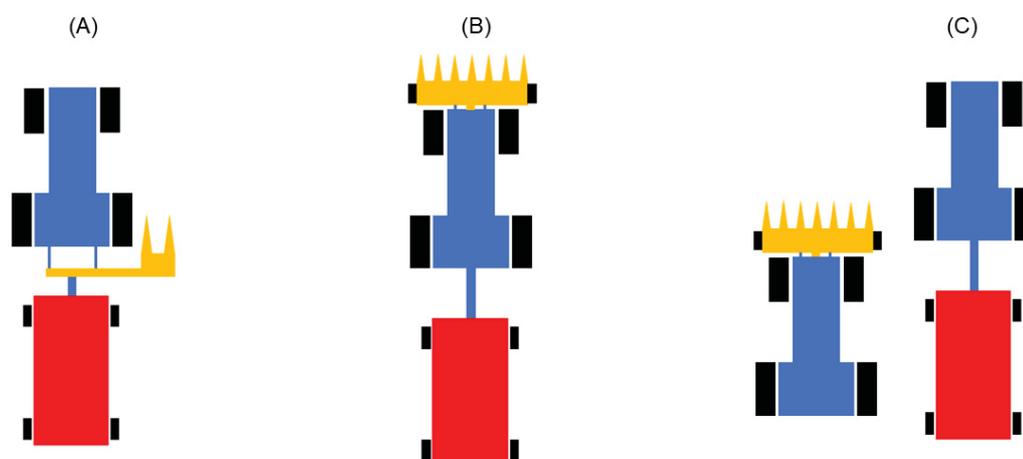
Trator	Case Farmall 80		New Holland T6 130	
Potência Nominal ISO TR 14396 (kW / HP)	59 / 80		97 / 132	
Tipo de Tração	4x2 TDA*			
Índice de Antecipação (%)	2.37		3.02	
	Pneu Dianteiro	Pneu Traseiro	Pneu Dianteiro	Pneu Traseiro
Tipo de Pneu	Goodyear 12.4-24	Goodyear 18.4-30	Goodyear 14.9-28	Pirelli 18.4-38
Pressão de Insuflagem – kPa (PSI)	137 (20)	110 (16)	220 (32)	110 (16)

\*TDA – Tração Dianteira Auxiliar.

O arranjo experimental adotado em blocos, consistindo em três tratamentos (modalidades de colheita): T<sub>LU</sub>) colhedora de forragem de linha única; T<sub>AT</sub>) colhedora de forragem de área total; e T<sub>ATT</sub>) colhedora de área total com conjunto de transbordo de apoio. Cada parcela do experimento (tratamento) consistiu em uma faixa de 200 m.

As modalidades de colheita com os conjuntos foram divididas em três tratamentos, conforme descrito: os tratamentos denominados T<sub>LU</sub> e T<sub>AT</sub>, consistiram na colheita realizada pelo Conjunto A e B respectivamente, em que, para o escoamento do material colhido foi acoplado na barra de tração do trator uma carreta de volume 13 m<sup>3</sup> (FIGURA 2A e 2B). Após o enchimento, interrompia-se a colheita, e fazia-se o desacoplamento da barra de tração e substituição por outra de mesma dimensão. Para o tratamento T<sub>ATT</sub>, foi utilizado o Conjunto B, realizando o escoamento do material sem interrupção, em carreta de volume 13 m<sup>3</sup> no sistema de transbordo, a qual foi acoplada a barra de tração de trator de 57 kW (78 cv) formando o conjunto de apoio (trator + carreta) (FIGURA 2C). O conjunto de apoio deslocava-se na forma de transbordo, lateralmente ao Conjunto B, e quando a carga era completada, havia a substituição por outro conjunto de apoio de mesma dimensão, sem interrupção na colheita.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MODALIDADES DE COLHEITA  $T_{LU}$  (A),  $T_{AT}$  (B) E  $T_{ATT}$  (C)



Fonte: O autor (2021)

O conjunto transbordo, possuía o trator de 78 cv (New Holland TL75E) montado com pneus Pirelli de dimensões 12.4-24 e 18.4-30 no eixo dianteiro e traseiro respectivamente. Os pneus foram insuflados com as pressões de 137 kPa (20 PSI) na dianteira e 110 kPa (16 PSI) na traseira, gerando um índice de antecipação cinemática da roda dianteira em relação a roda traseira de 2,33%. A carreta transbordo (Ipacol, modelo VFA12), possui pneus Maggion 7.50-16, single no eixo dianteiro e duplado no eixo traseiro, e pressão de insuflagem de 344 kPa (50 PSI) para todos os pneus.

Para o trator do conjunto A, foi adotado marcha GII M1, com rotação no motor de 2.100 RPM, visando garantir 540 RPM na Tomada de Potência (TDP) traseira. No trator do conjunto B foi utilizada a marcha GI M1L e rotação no motor de 2.200 RPM para garantir 1.000 RPM na TDP dianteira. Ambos os tratores estavam com os tanques de combustível completos e tração dianteira auxiliar (TDA) acionada durante o experimento.

A velocidade operacional de colheita foi determinada com o uso de sensor de velocidade Agrosystem modelo SVA-60, utilizando-se o número de pulsos emitidos pelo sensor durante a realização do experimento. Os valores médios da velocidade para os tratamentos  $T_{LU}$ ,  $T_{AT}$ ,  $T_{ATT}$  foram de 1,01; 0,73; 0,84  $m s^{-1}$ , respectivamente.

A carga estática dos conjuntos (incluindo-se o trator utilizado no conjunto de transbordo), e a distribuição de massa nos eixos (Tabela 2), com os equipamentos

de colheita na posição de trabalho, foi determinada com balança CELMIG, modelo CM-1002, composta por quatro sapatas. Ressalta-se que os tratores estavam com os tanques de combustíveis completos durante o período do estudo.

TABELA 2 – QUANTIDADE DE LASTRO SÓLIDO, DISTRIBUIÇÃO DE MASSA SOBRE O EIXO E MASSA TOTAL DOS CONJUNTOS A, B E DO TRATOR DE APOIO (TRANSBORDO)

	Lastro sólido adicionado - kg		Massa no Eixo – kg (%)		Massa Total - kg
	Dianteira	Traseira	Eixo Dianteiro	Eixo Traseiro	
Conjunto A	180	100	1.484 (34)	2.884 (66)	4.368
Conjunto B	-	920	5.730 (69)	2.575 (31)	8.305
Trator de Apoio	160	200	1.602 (42)	2.221 (58)	3.823

Mensurou-se também a massa da carreta utilizada na colheita, com o uso das mesmas balanças de sapatas descritas anteriormente. A massa da carreta utilizada após a colheita da parcela foi de 5,450 kg, sendo este o valor adotado para os cálculos no presente trabalho.

A área de contato dos pneus foi medida a partir da impressão do rodado sobre superfície plana de concreto, em todas as rodas, para os Conjuntos A e B, e o trator de apoio com o transbordo. O contorno dos pneus foi marcado com serragem afim de delimitar suas impressões (Figura 3). Após a demarcação, o eixo do trator foi levantado com o uso de macacos hidráulicos, e as impressões deixadas na superfície foram registradas em fotografias digitais e analisadas com o uso do software AutoCAD 2021, no qual foi realizada a correção de escala e a determinação da área de contato.

FIGURA 3 - IMPRESSÃO DA ÁREA DE CONTATO DO PNEU DIANTEIRO DIREITO DO CONJUNTO A



Fonte: O autor (2021)

A pressão média de contato do rodado com o solo foi determinada pela relação entre a massa total sobre o rodado e a área de contato do pneu, através da Eq. 1, descrita por Mialhe (1980).

$$P_m = \frac{W}{S} \quad (1)$$

em que,

$P_m$  – Pressão média aplicada ao solo pelo rodado, kPa

$W$  – Carga suportada pelo rodado, N

$S$  – Área de contato do pneu,  $m^2$

As pressões de contato dos pneus com o solo obtidas para os conjuntos A, B, para o trator de apoio e para a carreta de colheita, são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 – PRESSÃO MÉDIA (kPa) APLICADA AO SOLO PELOS RODADOS NOS DOIS CONJUNTOS DE COLHEITA E DE APOIO UTILIZADOS NO EXPERIMENTO

	Dianteiro Esquerdo - kPa	Dianteiro Direito - kPa	Traseiro Esquerdo - kPa	Traseiro Direito - kPa
Conjunto A	27,70	25,82	21,11	21,64
Conjunto B	47,07	43,58	21,67	21,26
Trator de Apoio	29,90	27,87	16,25	16,65
Carreta de Colheita	113,67	116,32	55,57	57,36

### 3.4.3 ANÁLISES DE SOLOS

#### 3.4.3.1 GRANULOMETRIA

Para determinação da granulometria do solo (TABELA 4), foram coletadas amostras na área experimental, em quatro trincheiras nas camadas de 0 - 0,2 m e 0,2 - 0,4 m. As amostras foram acondicionadas em recipiente apropriado e levadas ao laboratório AgroTecSolo, localizado no município de Campo Largo, Região Metropolitana de Curitiba. Neste laboratório, as amostras foram submetidas a análise pelo método do Densímetro de Bouyoucos, proposto por Gee e Bauder (1986).

TABELA 4 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL

Camada	Argila g kg <sup>-1</sup>	Silte g kg <sup>-1</sup>	Areia g kg <sup>-1</sup>
		g kg <sup>-1</sup>	
0 – 0,2 m	350	250	400
0,2 – 0,4 m	370	280	350

Em posse da caracterização granulométrica, e com o uso do triângulo textural para classificação dos solos brasileiros (SANTOS et al., 2005) pode-se determinar que a classe textural do solo da área de estudo é franco-argilosa.

### 3.4.3.2 POROSIDADE DO SOLO

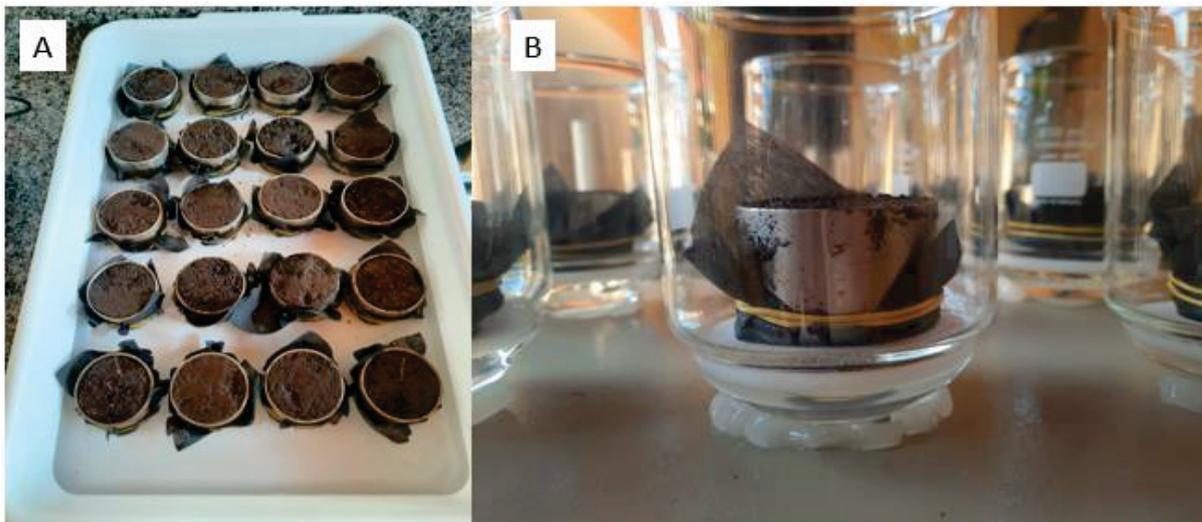
Momentos antes do início da operação de colheita da silagem, foram retiradas amostras indeformadas de solo com o uso de anéis volumétricos de diâmetro 4,75 cm e volume de 59,85 cm<sup>3</sup> (previamente aferidas em laboratório). Estas amostras foram obtidas nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m em quatro pontos aleatórios ao longo da área experimental, nas entrelinhas do cultivo, totalizando oito amostras.

Vinte e quatro horas após a colheita da silagem na área experimental, novamente coletou-se anéis volumétricos nas mesmas profundidades, porém na linha de passagem do rodado, a fim de verificar o dano ocasionado no solo após o tráfego dos conjuntos na colheita. Estas amostras foram coletadas em quatro pontos distintos de cada uma das faixas experimentais, totalizando 24 amostras.

Após as coletas, os anéis foram identificados, acondicionados em plástico filme PVC, e levadas ao LATA para as análises correspondentes.

Os valores de micro, macro e porosidade total do solo foram calculados conforme a metodologia proposta pela EMBRAPA (2017). Em laboratório, a amostra indeformada que foi coletada foi preparada com tecido e liga de borracha (com o intuito de evitar a perda de solo ao longo da análise) e saturada por 24 horas em recipiente com água desaerada (Figura 4A). Com o uso de balança semi-analítica a massa do anel com solo saturado foi mensurada, e então levada ao funil de placa porosa onde foi aplicado uma tensão de 0,6 m de coluna de água, equivalente a 6 kPa (Figura 4B). Foi adotada esta coluna de água, pois ao submeter as amostras a esta tensão, os macroporos (diâmetro maior que 50 µm) seriam drenados (KLEIN & LIBARDI, 2002).

FIGURA 4 - AMOSTRAS INDEFORMADAS SENDO SATURADAS (A) E SUBMETIDAS A TENSÃO DE COLUNA DE ÁGUA 6KPA NO FUNIL DE PLACA POROSA



Fonte: O autor (2021)

Após o equilíbrio, novamente as amostras tiveram suas massas aferidas, e então levadas a estufa em temperatura de 105°C até obtenção de massa constante, tendo suas massas mensuradas novamente ao final do processo. Em posse dos valores obtidos, calculou-se por meio das equações 2 e 3 a porosidade total e a microporosidade.

$$P_t = \frac{[(a - b) - (c - d)]}{e} \quad (2)$$

$$M_i = \frac{(f - b)}{e} \quad (3)$$

em que,

P<sub>t</sub> – Porosidade total, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>

a – massa do conjunto amostra-anel-tecido saturado, g

b – massa do conjunto amostra-anel-tecido secos a 105°C, g

c – massa do conjunto anel-tecido saturado, g

d – massa do conjunto anel-tecido secos a 105°C, g

e – volume da amostra, cm<sup>3</sup>

M<sub>i</sub> – Microporosidade, m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>

f – massa do conjunto amostra-anel-tecido após submetidos ao potencial de 6kPa, g

A macroporosidade foi encontrada a partir da diferença entre a porosidade total e a microporosidade, calculadas anteriormente.

### 3.4.3.3 UMIDADE VOLUMÉTRICA E DENSIDADE DO SOLO

As mesmas amostras volumétricas coletadas para as análises de porosidade foram utilizadas nos cálculos de umidade volumétrica e densidade do solo.

Para a umidade volumétrica, as amostras coletadas tiveram suas massas mensuradas com balança semi-analítica antes de serem submetidas a saturação, e após permanecerem em estufa a 105°C até obtenção de massa constante. O cálculo da umidade volumétrica foi realizado conforme a Eq. 4.

$$U_v = \frac{(g - b)}{e} \quad (4)$$

em que,

$U_v$  – umidade volumétrica,  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

$g$  – massa da amostra-anel-tecido úmida antes do procedimento de saturação, g

A densidade do solo foi calculada com base na Eq. 5

$$D_s = \frac{(b - d)}{e} \quad (5)$$

em que,

$D_s$  – densidade do solo,  $\text{g cm}^{-3}$

#### 3.4.3.4 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RSP)

Para avaliação da RSP, foi utilizado penetrômetro eletrônico da marca Falker, modelo PLG 1020 (FIGURA 5). Este equipamento foi configurado para realizar leituras a cada 0,01 m até a profundidade de 0,4 m. O cone utilizado foi do tipo 2, com diâmetro de 12,83 mm e ângulo de 30°, e a velocidade de inserção da haste de 0,02 m s<sup>-1</sup>, seguindo o estabelecido pela norma S313.3 (ASABE, 2012). Quando a velocidade de inserção da haste passava de 0,03 m s<sup>-1</sup> o equipamento registrava um erro e a medição era refeita.

FIGURA 5 – PENETRÔMETRO FALKER PLG 1020



FONTE: Falker (2021)

Foram realizadas com este equipamento 60 leituras para cada um dos tratamentos ao longo da parcela experimental, sendo metade delas na linha de passagem do rodado e a outra metade na entrelinha (onde não houve tráfego durante a colheita). A coleta da RSP ocorreu de forma a contemplar a variação da massa da carreta ao longo do tiro de colheita ocasionado pelo enchimento dela. No total, nesta área experimental, 180 pontos de RSP foram coletados.

### 3.4.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados obtidos de resistência a penetração foram analisados estabelecendo-se o intervalo de confiança pelo teste T a 10% de probabilidade, a cada cinco centímetros de profundidade. A mesma análise foi utilizada para os resultados de macro, micro e porosidade total, densidade do solo e umidade volumétrica nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m. Para o cálculo do intervalo de confiança, utilizou-se a Eq. 2

$$IC = \frac{(T \times DESVPAD)}{\text{raiz } nr} \quad (2)$$

em que,

IC – Intervalo de Confiança

T – Valor de t tabelado a 10% de probabilidade

DESVPAD – Desvio-padrão

raiz nr – Raiz quadrada do número de repetições

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos gráficos 1 a 4 são apresentados os valores de macro, micro e porosidade total, umidade volumétrica e densidade do solo na área experimental, nos tratamentos T<sub>LU</sub>, T<sub>AT</sub>, T<sub>ATT</sub> e Prévio a colheita nas camadas de 0 – 0,2 m e 0,2 - 0,4 m.

GRÁFICO 1 – MACRO, MICRO E POROSIDADE TOTAL ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM), TLU (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA), TAT (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E TATT (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NA CAMADA DE 0 – 0,2 M

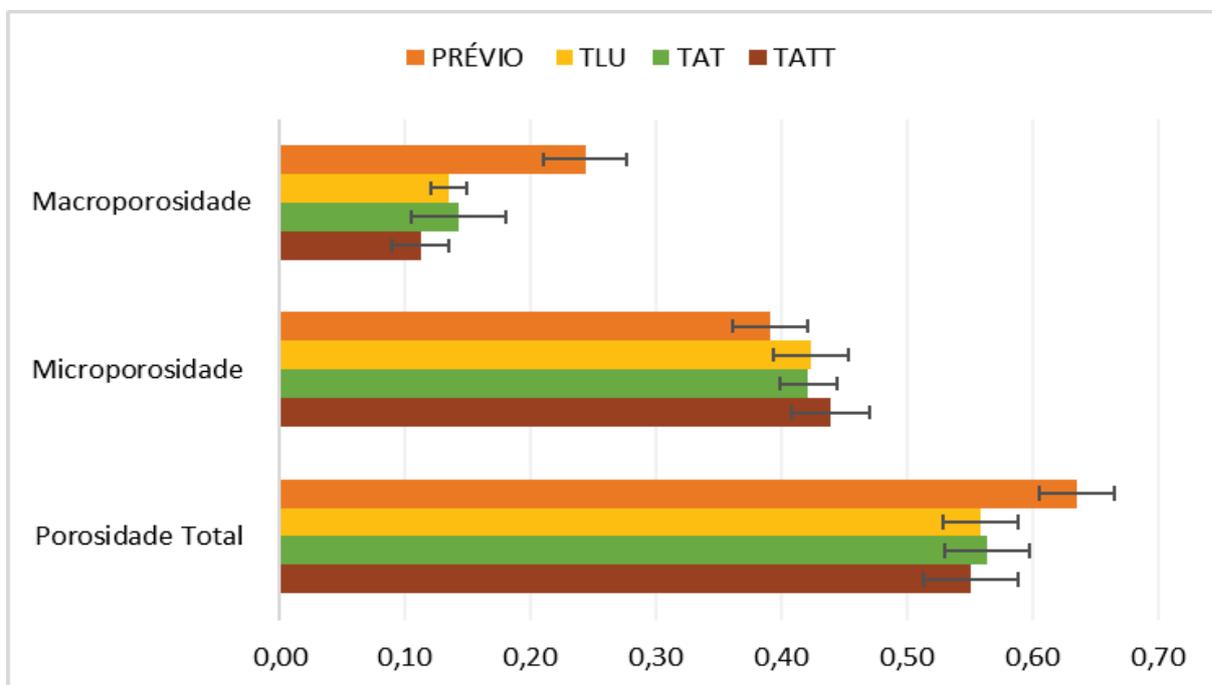
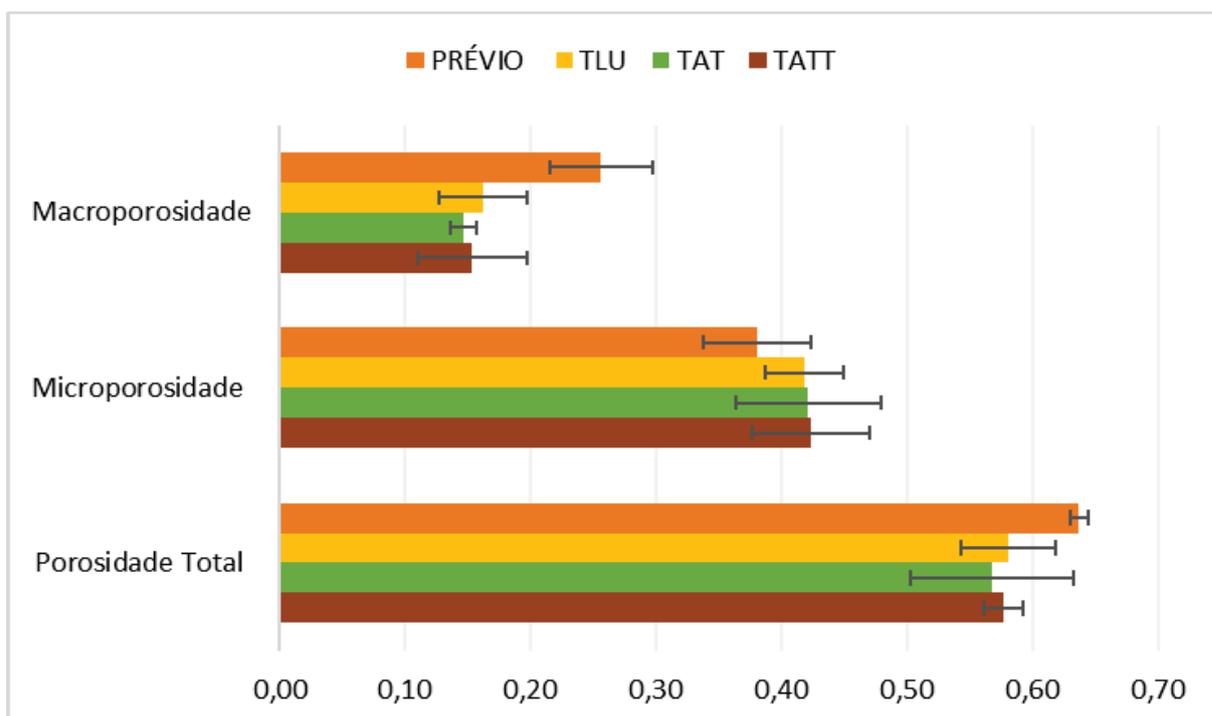


GRÁFICO 2 - MACRO, MICRO E POROSIDADE TOTAL ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM), TLU (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA), TAT (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E TATT (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NA CAMADA DE 0,2 – 0,4 M



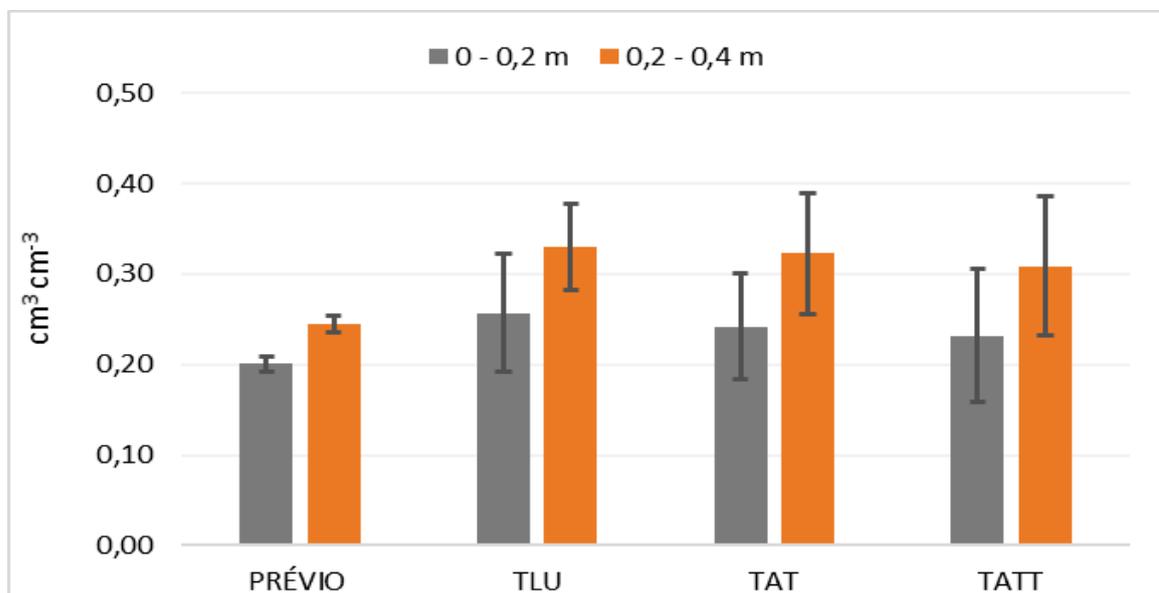
Observando as duas camadas avaliadas nota-se que o volume de macroporos e a porosidade total em todos os tratamentos, com exceção do conjunto com área total sem o uso de transbordo na camada de 0,2-0,4 m, foram estatisticamente menores em relação ao momento prévio a colheita, enquanto não houve diferença entre os tratamentos para a microporosidade. Ao mesmo tempo, percebe-se que os diferentes conjuntos de colheita foram semelhantes em relação as mudanças que causaram na porosidade do solo.

Para Brady & Weil (2008) um solo pode ser considerado com estrutura ideal e boas condições de crescimento radicular quando apresentar porosidade total próxima a  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Kiehl (1979) recomenda que a distribuição de tamanho de poros seja de 1/3 para macroporos e cerca de 2/3 para microporos. Assim sendo, considerando os diferentes conjuntos de colheita utilizados, todos permitiram ao solo manter uma quantidade superior a recomendada pela literatura.

Botta et al., (2008) e Cambi et al (2016) ressaltam que o tráfego de máquinas nas áreas de cultivo, provocam mudanças significativas nas propriedades físicas do solo, sendo a primeira passada responsável por 75 a 80% do dano total. No presente trabalho, nota-se que independentemente do tamanho do conjunto de colheita, bem como do número de passadas na área (levando em conta o uso do conjunto de apoio no  $T_{ATT}$ ), a redução na macroporosidade, e porosidade total do solo foi semelhante. Porém, em todas as modalidades de colheita utilizou-se a carreta de transporte, que possui pneus com baixa área de contato, o que causou uma grande pressão sobre o solo (TABELA 3).

É importante ressaltar que para alguns autores como Lanzasova (2007), solos com macroporosidade menor que  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  tornam-se críticos para o desenvolvimento de culturas. Nas camadas de 0-0,2 m a modalidade de colheita  $T_{ATT}$  obteve o menor valor absoluto de macroporosidade dentre os tratamentos, ficando próximo do limiar estabelecido pelo autor, devendo-se atentar para o manejo da área quando ocorrer essa modalidade de colheita.

GRAFICO 3 – UMIDADE VOLUMÉTRICA ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM), TLU (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA), TAT (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E TATT (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NAS CAMADAS AVALIADAS



Os valores de umidade volumétrica (Uv) do solo variaram de 0,20 a 0,32  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , sendo os menores valores encontrados na camada superficial em cada tratamento. As maiores perdas de umidade na superfície (0-0,2m) em relação as maiores profundidades ocorrem por evaporação (PERES, 2010), e na silagem isso se intensifica devido a colheita deixar o mínimo possível de cobertura vegetal (palhada) sobre a área (JEMISON et al., 2019).

Nota-se que a umidade volumétrica momentos antes da colheita (PRÉVIO) foi menor em valores absolutos em relação as coletas que ocorreram 24 horas após a passagem dos equipamentos de colheita. Isso pode ser explicado por uma chuva localizada que ocorreu após a passagem dos conjuntos de colheita e antes da segunda coleta. Szymczak et al., (2014) comprova que a umidade influencia significativamente nas propriedades físicas do solo, contudo ao avaliar a diferença nestas propriedades durante a presença de chuva e após três e sete dias, não encontrou variação significativa na qualidade física do solo.

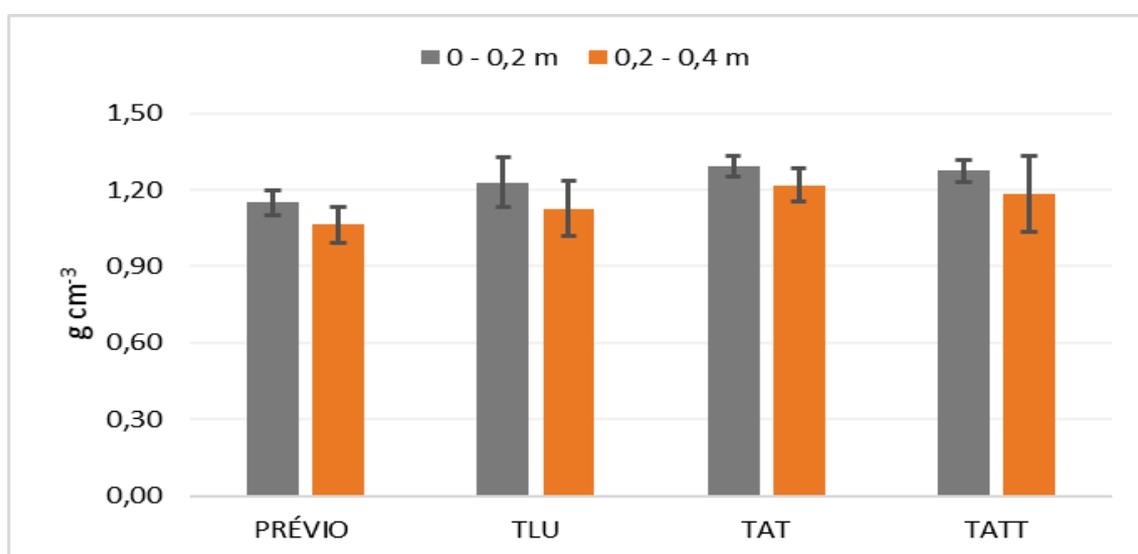
A Uv nos tratamentos TLU, TAT e TATT encontravam-se dentro do intervalo considerado normal por Molin et al (2012) para mensuração da resistência do solo a penetração, que é entre 0,20 a 0,40  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Ressalta-se que estes valores de Uv

não diferiram estatisticamente entre as modalidades de colheita e entre as profundidades avaliadas.

A umidade do solo é uma variável que deve ser associada com a resistência a penetração, pois a água atua como lubrificante das partículas do solo, e quanto menor a umidade do solo, maior a sua resistência, o que pode gerar a falsa ideia de compactação.

A densidade do solo ( $D_s$ ) é descrita como a relação existente entre a massa de solo seco e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros. Em todas as condições avaliadas, o valor da densidade do solo ( $D_s$ ) permaneceu entre 1,06 a 1,29  $\text{g cm}^{-3}$ . Diversos autores apresentam valores de  $D_s$  considerados críticos para a produtividade ou crescimento radicular de inúmeras culturas, exemplo de Reichardt & Timm (2004) que afirmam os limites de densidade para um bom crescimento vegetal varia entre 1,0 a 1,4  $\text{g cm}^{-3}$ .

GRÁFICO 4 – DENSIDADE DO SOLO ( $\text{g cm}^{-3}$ ) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: PRÉVIO (ANTES DA COLHEITA DA SILAGEM), TLU (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA), TAT (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E TATT (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO) NAS PROFUNDIDADES AVALIADAS



Ao avaliar a  $D_s$  nota-se um incremento no valor na profundidade de 0-0,2 m com a passagem dos conjuntos de colheita. Isso acontece pois com a passagem do rodado, os espaços porosos são completados com solo expulsando o ar, reorganizando a disposição das partículas, reduzindo também a porosidade (DIAS JUNIOR & PIERCE, 1996).

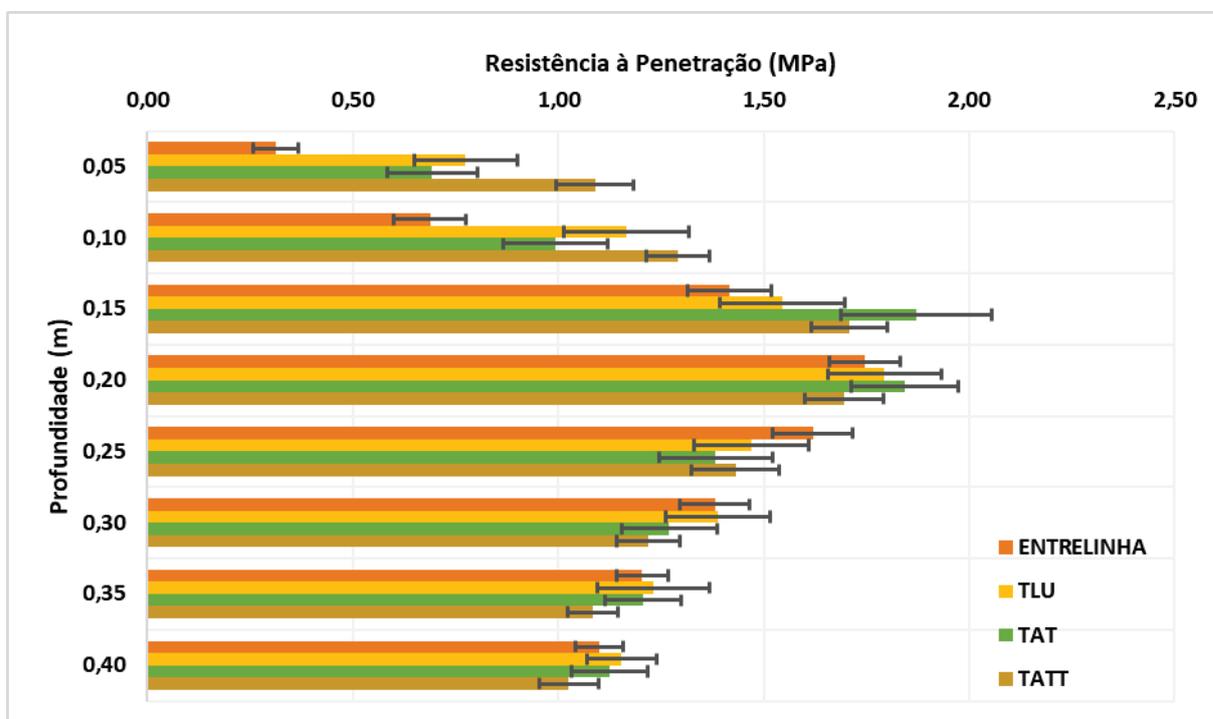
Linhares et al (2020) em estudo sobre o efeito da compactação de solo na qualidade da silagem em Latossolo Vermelho distroférico, nota um acréscimo na densidade do solo, e conseqüente redução na porosidade total com o aumento do número de passada subsequentes.

Os resultados encontrados demonstram que na camada superficial (0-0,2m) a densidade do solo foi alterada com o conjunto que utiliza a colhedora de forragem de área total, ou seja, o incremento na massa do conjunto, que resulta em maior pressão de solo resulta em acréscimo na Ds. Contudo ao verificar os valores deste parâmetro para a colhedora de linha única na mesma camada, os resultados não diferiram dos demais.

Para a maior camada avaliada, o conjunto com a colhedora frontal sem utilizar o transbordo promoveu maior Ds em relação a condição pré-colheita, e não diferiu dos demais tratamentos. Moraes et al., (2020) observou em pesquisa com tráfego de máquinas agrícolas, o aumento da densidade do solo com o tráfego de equipamentos (tratores ou colhedoras de grãos), não diferindo estatisticamente entre si.

No Gráfico 5 é apresentado o valor de resistência do solo a penetração na área experimental, nos tratamentos T<sub>LU</sub>, T<sub>AT</sub>, T<sub>ATT</sub> e Entrelinha na profundidade de 0-0,4 m.

GRÁFICO 5 – RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO (MPa) DA ÁREA EXPERIMENTAL NOS TRATAMENTOS: ENTRELINHA, TLU (COLHEDORA DE FORRAGEM DE LINHA ÚNICA), TAT (COLHEDORA DE FORRAGEM DE ÁREA TOTAL) E TATT (COLHEDORA DE ÁREA TOTAL COM CONJUNTO DE TRANSBORDO DE APOIO)



A resistência do solo a penetração (RSP) foi influenciada pelos tratamentos principalmente na camada superficial. Nos 15 primeiros centímetros de profundidade, nota-se o aumento da RSP ocasionada pelo tráfego de máquinas na área de cultivo, independente de qual foi a modalidade de colheita. Nesta faixa o uso do conjunto de apoio aliado a colhedora de área total promoveu um maior índice de RSP em relação ao seu não uso nesta modalidade, ou seja, nesta camada o tráfego de mais um trator, impacta neste parâmetro físico do solo.

Aos 0,15 m percebe-se que a colhedora de linha única não diferiu no dano ao solo em relação a RSP na entrelinha, nem da colhedora de área total, porém os tratamentos que envolveram o conjunto B diferiram estatisticamente do valor encontrado na entrelinha. Resultado este que corrobora com Shah et al., (2017) que relata que as causas de compactação de solo relacionadas a mecanização agrícola envolvem o tamanho das máquinas e a vibração ocasionadas por estas, bem como o sistema de produção da lavoura.

No preparo convencional de solo, o implemento mais utilizado é a grade aradora, que trabalha em camadas mais subsuperficiais e promove melhor rendimento operacional, contudo o uso frequente deste implemento pode causar a

reorganização de partículas do solo, levando a formação de camadas com elevado teores de RSP, designada pelo nome de “pé-de-grade” (LESPCH, 2011). Na profundidade de 0,20 e 0,25 m as modalidades de colheita não diferiram entre si nem da entrelinha, e apresentaram alto valor de RSP, porém inferiores 2,0 MPa, evidenciando o acúmulo de cargas dos implementos utilizados no preparo de solo, que ocasionaram o “pé-de-grade”, corroborando com resultados encontrados por Oliveira et al., (2017).

Na profundidade de 0,30; 0,35 e 0,40 m as modalidades de colheita não diferiram entre si na avaliação da RSP, e não foram diferentes do valor encontrado na entrelinha. Para Salire et al., (1994), a compactação do solo pode ocorrer nas camadas superficiais ou subsuperficiais, sendo que superficialmente acontece em razão da pressão de insuflagem do rodado, e na camada subsuperficial ocorre em função da carga total sobre o eixo. Tal fato não pode ser observado neste estudo, pois nas maiores profundidades os tratamentos não diferiram entre si, acreditando-se que em função do “pé-de-grade” mencionado anteriormente e encontrado na profundidade de 0,2 m.

### 3.6 CONCLUSÕES

- Os conjuntos de colheita promoveram redução na macroporosidade e porosidade total do solo, nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m.
- A colhedora de forragem de área total promove maior densidade do solo em relação ao momento prévio da colheita na camada de 0-0,2 m.
- A colheita mecanizada para silagem aumenta a resistência do solo a penetração até os primeiros 0,15 m de profundidade

## 3.7 REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22: 711–729, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. St. Joseph, 2012. (ASABE standard: S313.3)

BARCELOS, A. F. et al., Valor nutritivo e características fermentativas da silagem de capim-elefante com diferentes proporções de casca de café. **Ciência Animal Brasileira**, v. 19, n. 19, p. 1–12, 2018.

BERISSO, F. E. et al., Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, v. 131, p. 36-46, 2013

BOTTA G.F. et al., Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil Tillage Research**, v.101, p. 44-51, 2008

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Pearson Education, 2008.

CAMBI, M., et al. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. **IForest**, v. 9, p. 89–94, 2016.

CAVALLO, E.; FERRARI, E.; COCCIA, M. Likely technological trajectories in agricultural tractors by analysing innovative attitudes of farmers. **International Journal of Technology, Policy and Management**, v. 15, n. 2, p. 158, 2015.

CORTEZ, J. W. et al., Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Agrarian**, v. 11, n. 42, p. 343–351, 2018.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p.175- 182, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Pesquisa de Solos: Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Revista e Ampliada. EMBRAPA solos, Brasília, 577 p., 2017.

FILIPOVIC, D. et al. Effects of tractor bias-ply tyre inflation pressure on stress distribution in silty loam soil. **Soil and Water Research**, v. 11, n. 3, p. 190–195, 2016.

FRANCETO, T. R. et al., Tráfego de máquinas agrícolas e alterações na densidade do solo e porosidade total de um argissolo vermelho em área sob videira. **XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA**; Campo Grande. 2014.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W., Particle-size analysis. In **Methods of soil analysis**. Part 1. 2 ed. Agronomy Monographs. Madison, 1986, p. 383–411.

JEMISON, J. M. et al., Soil Health of Recently Converted No-till Corn Fields in Maine. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 1–13, 2019. Taylor & Francis.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.

LANZANOVA, M. E. et al., Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1131- 1140, 2007.

LEES K.J., et al., The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 273-282. 2016

LESPCH, Igor F. **19 lições de pedologia**. Oficina de textos, 2011.

LINHARES, A. J. de S. et al., Soil compaction affects the silage quality of sunflower and Paiaguas palisadegrass (*Brachiaria brizantha*) grown on a Latosol in the Brazilian savana. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 7, p. 1121-1130, 2020

MIALHE LG. **Máquinas motoras na agricultura**. 2 ed. São Paulo: 1980.

MOLIN, J.P.; DIAS, C.T.S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.16, n.5, p. 584-590,2012.

MORAES M.T., et al., Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil Tillage Research** v. 200, n. 6, p. 1-14, 2020

NAGAHAMA, H. DE J.; et al., Comunicação Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agrônômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 741–746, 2016.

OLIVEIRA, M. P.; et al., Efeito residual da gessagem e calagem na resistência à penetração obtida com dois penetrômetros em diferentes sistemas de manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n. 1, p. 58-64, 2017.

PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A.; Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30; n. 5; p. 875-886, 2010.

RENČÍN, L.; POLCAR, A.; BAUER, F. The Effect of the Tractor Tires Load on the Ground Loading Pressure. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, v. 65, n. 5, p. 1607–1614, 2017.

REICHARDT, K. & TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. São Paulo, Manole, 2004.

SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, v.31, p. 235-248, 1994.

SANTOS, R.D. et al., **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 5th ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Embrapa, Rio de Janeiro, 2005

SHAH, A. N. et al., Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017.

SIMECKOVA, J., et al., Changes of physical properties of the soil after the passage of an agricultural tractor. **Agrophys**, v. 35, p. 97-105, 2021.

SOANE, B. D.; et al., Compaction by agricultural vehicles: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 1, 207-237, 1980.

SZYMCZAK, D. A.; et al., Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de Pinus taeda L. na região Sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v.38, p. 641-648, 2014.

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

UNGUREANU, N.; et al., Agricultural soil compaction under the action of agricultural machinery. **Simpozu Aktualni Zadaci Mehanizacue Poljoprivrede** , Croatia, p. 31–42, 2015

YAHYA Z., et al., Alterations of soil physical properties due to mechanization activities under oil palm on Bernam series soil. **International Journal of Agriculture Innovations and Research**, v. 3, p. 1435-1446, 2015

## 4 CAPÍTULO III: MAPAS DE ISOCOMPACTAÇÃO EM MODALIDADES DE COLHEITA DE SILAGEM

### 4.1 RESUMO

As áreas de cultivo de silagem são submetidas a elevado tráfego de máquinas que podem causar compactação do solo causando a degradação e restringindo o desenvolvimento da cultura. Desta forma, objetivou-se avaliar a resistência do solo a penetração de maneira espacial em diferentes camadas, quando o solo submetido a duas diferentes modalidades de colheita de silagem de planta inteira de milho. Utilizou-se duas colhedoras: de linha única e de área total com conjunto transbordo de apoio, sendo cada um dos conjuntos responsáveis pela colheita de uma área determinada. Gerou-se um grid de coletas de 30x30 m para a colhedora de área total e 20x20 m para a de linha única, para mensurar a resistência do solo a penetração (RSP) na camada de 0-0,40m com o uso de penetrometro eletrônico. Em cada um dos pontos amostrais gerados pelo grid, foram coletadas 10 subamostras distantes até três metros do ponto georreferenciado. Os dados coletados foram submetidos a análise descritiva composta dos cálculos de medidas de tendencia central (média aritmética, mediana e moda), de dispersão (amplitude, desvio-padrão e coeficiente de variação), de assimetria e curtose. Posteriormente estes dados foram interpolados através do inverso do quadrado da distância (IDW) para geração de um mapa temático. As médias de RSP foram superiores para o conjunto que utilizou a colhedora frontal em todas as profundidades avaliadas chegando ao valor de 2,76 MPa em relação a 2,20 MPa para o conjunto de linha única. Através da análise visual do mapa temático, nota-se pontos com elevada RSP na profundidade de 0,1-0,2m que ultrapassam os 3,0 MPa podendo ser utilizado como orientação para descompactação de solo localizada.

Palavras-chave: geoestatística, compactação de solo, agricultura de precisão, *Zea mays*

### 4.2 ABSTRACT

Silage growing areas are subjected to high machine traffic that can cause soil compaction, causing degradation and restricting crop development. Thus, the objective was to evaluate the resistance of the soil to penetration in a spatial way in different layers when the soil subjected to two different harvesting modalities of whole corn plant silage. Two harvesters were used: single-row and full-area with a support overflow set, with each set responsible for harvesting a specific area. A 30x30 m collection grid was generated for the total area harvester and 20x20 m for the single line harvester, to measure the soil penetration resistance (RSP) in the 0-0.40 m layer using an electronic penetrometer. At each of the sampling points generated by the grid, 10 sub-samples were collected up to three meters from the georeferenced point. The collected data were subjected to descriptive analysis consisting of calculations of measures of central tendency (arithmetic mean, median and mode), dispersion (amplitude, standard deviation, and coefficient of variation), asymmetry and kurtosis. Subsequently, these data were interpolated using the inverse square of the distance (IDW) to generate a thematic map. RSP averages were higher for the set that used the frontal harvester at all depths evaluated, reaching a value of 2,76 MPa compared to 2.20 MPa for the single row set. Through the visual analysis of the thematic map,

points with high RSP at a depth of 0.1-0.2 m that exceed 3.0 MPa can be noted, which can be used as guidance for localized soil decompaction.

Keywords: geostatistics, soil compaction, precision agriculture, *Zea mays*

### 4.3 INTRODUÇÃO

A exploração dos solos visando a produção de alimentos potencializa a sua degradação de diversas formas, sendo uma delas a compactação, causada principalmente pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas. Um dos parâmetros mais utilizados para a avaliação da compactação é a resistência do solo a penetração (RSP) (OLIVEIRA FILHO et al., 2015). A RSP pode ser considerada fator limitante ao desenvolvimento radicular da cultura, pois há relação inversa entre o teor de água do solo e o valor da RSP (RAWLS et al., 2003).

Em áreas de silagem, a compactação do solo é uma das principais causadoras da redução de produção agrícola devido ao intenso tráfego de máquinas nas operações de semeadura, manejo e colheita, aliado ao fato destas áreas serem cultivadas anualmente com este propósito (NAGAHAMA et al., 2016).

Duttmann et al. (2014) ressalta que nestas áreas de produção, o tráfego pode chegar a 70% da área de cultivo, e desta forma a compactação do solo é potencializada, principalmente quando não são respeitadas as condições ideais do solo para o tráfego agrícola. No caso de pequenas propriedades, a quantidade de tráfego pode ser maior, devido ao uso máquinas de colheita de linha única, que fazem com que ocorra o aumento do número de passadas do trator sobre o mesmo local, intensificando os efeitos sobre o solo (CARRARA et al., 2007; MELO et al., 2019).

A deterioração do solo devido a atividades agrícolas é considerada um problema mundial, e por meio de mapas pode-se explorar como estas atividades limitam o potencial produtivo das áreas (SVORAY et al., 2015), e desta forma orientar quais mudanças nos equipamentos podem ser benéficas para evitar a degradação dos solos (LAMANDÉ et al., 2018).

Monitorar os atributos do solo é uma questão com alto grau de complexidade. Isso porque se constituem de uma complexa interação de fatores pedogenéticos, relacionados a seu material de origem (possuem diferenças

relacionadas a dureza, composição química, cristalização) e são influenciados pelas condições de clima e relevo, resultando assim na variabilidade espacial (MATIAS et al., 2015).

Os valores de RSP são altamente influenciados por fatores intrínsecos e extrínsecos, tais como: umidade do solo, textura, estrutura e sistemas de manejo. Como consequência disto, altos coeficientes de variação são obtidos (STORCK et al., 2016), o que torna crucial estabelecer uma densidade de amostras e subamostras por área.

Mapas temáticos são construídos para identificar variabilidades nas propriedades do solo, plantas e produtividades com base em amostras coletadas durante um ciclo da cultura. São utilizados frequentemente junto a dados interpolados para representar zonas de manejo, que podem ser utilizados por até diversos ciclos da cultura (BETZEK et al., 2019)

Diante do exposto, objetivou-se avaliar resistência do solo a penetração em diferentes camadas, quando o solo submetido a modalidades de colheita de silagem de planta inteira de milho.

## 4.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.4.1 ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi desenvolvido na Fazenda Canguiri, localizada em Pinhais-PR, Brasil, em Área de Preservação Ambiental (APA), próximo as coordenadas centrais 7189700.00 de latitude e 688900.00 de longitude, Fuso 22J, Datum WGS84. De acordo com a classificação climática de Köppen o clima é do tipo Cfb (clima oceânico temperado) com temperatura média de 22°C (ALVARES et al., 2014).

A área experimental de 8,45 ha (FIGURA 1), foi semeada na segunda quinzena de novembro com o Híbrido Biomatrix BM915PRO em espaçamento de 0,8 m entre linhas e população de 54,6 mil plantas por hectare. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-amarelo álico, com declividade de 8% no sentido de cultivo, com preparo convencional de solo (uma gradagem intermediária e uma gradagem niveladora em sequência). A adubação de base foi de 350 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 08-20-20 e adubação de cobertura com 400 de kg ha<sup>-1</sup> de ureia (46% de nitrogênio)

aplicada 45 dias após a semeadura, não sendo realizado controle com produtos fitossanitários ao longo do cultivo.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO NA FAZENDA EXPERIMENTAL CANGUIRI - PR



Datum SIRGAS 2000, Projeção UTM 22S. Fonte: O autor (2021)

#### 4.4.2 DESCRIÇÃO DOS CONJUNTOS DE COLHEITA UTILIZADOS

A execução do experimento foi realizada com o processamento da planta inteira de milho para silagem, realizada 120 dias após a semeadura, com teores de matéria seca variando entre 30 e 35%, estando dentro do recomendado por Ferrareto et al., (2018). Para o processamento da ensilagem, foram utilizadas duas colhedoras de forragem: a primeira composta por linha única de colheita lateral, modelo JF C120; a segunda de área total e colheita frontal modelo JF 2000 AT. Ambas as máquinas com doze facas de corte, reguladas para o corte de partícula de  $4 \times 10^{-3}$  m e não equipadas com quebrador de grãos.

Foram utilizados dois tratores, um Case Farmall 80 e um New Holland T6 130, cujas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 1. Com estes tratores, dois conjuntos trator-forrageira foram formados: A) a colhedora JF C120 e o trator Farmall 80, e B) a colhedora JF 2000 AT com o trator New Holland T6 130.

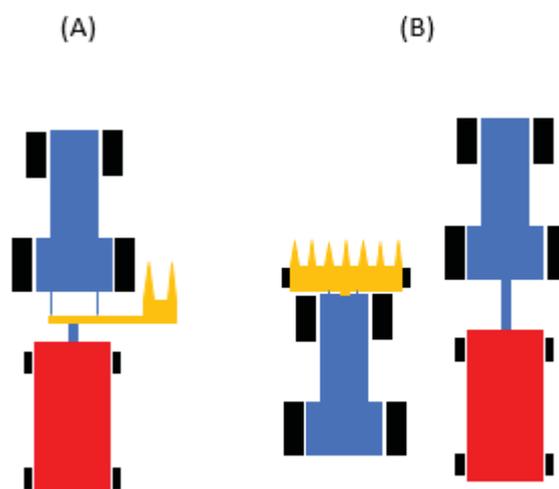
TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS TRATORES DOS CONJUNTOS A E B

Trator	Case Farmall 80		New Holland T6 130	
Potência Nominal ISO TR 14396 (kW / HP)	59 / 80		97 / 132	
Tipo de Tração	4x2 TDA*			
Índice de Antecipação (%)	2,37		3,02	
	Pneu Dianteiro	Pneu Traseiro	Pneu Dianteiro	Pneu Traseiro
Tipo de Pneu	Goodyear 12.4-24	Goodyear 18.4-30	Goodyear 14.9-28	Pirelli 18.4-38
Pressão de Insuflagem (kPa)	137	110	220	110

\*TDA – Tração Dianteira Auxiliar.

As modalidades de colheita foram divididas em dois tratamentos, conforme descrito: os tratamentos denominados  $T_{LU}$  e  $T_{ATT}$ , consistiram na colheita realizada pelo Conjunto A e B respectivamente. Para o conjunto A o escoamento do material colhido foi realizado em carreta de volume de 13 m<sup>3</sup> acoplado a barra de tração do próprio trator. Após o enchimento, interrompia-se a colheita e fazia-se o desacoplamento da barra de tração e substituição por outra de mesma dimensão (FIGURA 2A). Para o tratamento  $T_{ATT}$ , realizou-se o escoamento do material sem interrupção, em carreta de volume 13 m<sup>3</sup> no sistema de transbordo, a qual foi acoplada a barra de tração de trator de 57 kW (78 cv) formando o conjunto de apoio (trator + carreta) (FIGURA 2B). O conjunto de apoio deslocava-se na forma de transbordo, lateralmente ao Conjunto B, e quando a carga era completada, havia a substituição por outro conjunto de apoio de mesma dimensão, sem interrupção na colheita.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MODALIDADES DE COLHEITA  $T_{LU}$  (A), E  $T_{ATT}$  (B)



Fonte: O autor (2021)

O conjunto transbordo, possuía o trator de 78 cv (New Holland TL75E) montado com pneus Pirelli de dimensões 12.4-24 e 18.4-30 no eixo dianteiro e traseiro respectivamente. Os pneus foram insuflados com as pressões de 137 kPa (20 PSI) na dianteira e 110 kPa (16 PSI) na traseira, valores estes recomendados pelo fabricante, gerando um índice de antecipação cinemática da roda dianteira em relação a roda traseira de 2,33%. A carreta transbordo (Ipacol, modelo VFA12), possui pneus Maggion 7.50-16, single no eixo dianteiro e duplado no eixo traseiro, e pressão de insuflagem de 344 kPa (50 PSI) para todos os pneus.

Para o trator do conjunto A, foi adotado marcha GII M1, com rotação no motor de 2.100 RPM, visando garantir 540 RPM na Tomada de Potência (TDP) traseira. No trator do conjunto B foi utilizada a marcha GI M1L e rotação no motor de 2.200 RPM para garantir 1.000 RPM na TDP dianteira. Ambos os tratores estavam com tração dianteira auxiliar (TDA) acionada durante o experimento.

A carga estática dos conjuntos (incluindo-se o trator utilizado no conjunto de transbordo), e a distribuição de massa nos eixos, com os equipamentos de colheita na posição de trabalho, foi determinada com balança CELMIG, modelo CM-1002, composta por quatro sapatas, com as massas definidas na Tabela 2. Ressalta-se

que os tratores estavam com os tanques de combustíveis completos durante a medição de suas massas.

TABELA 2 – QUANTIDADE DE LASTRO SÓLIDO, DISTRIBUIÇÃO DE MASSA SOBRE O EIXO E MASSA TOTAL DOS CONJUNTOS A, B E DO TRATOR DE APOIO (TRANSBORDO)

	Lastro sólido adicionado - kg		Massa no Eixo – kg (%)		Massa Total - kg
	Dianteira	Traseira	Eixo Dianteiro	Eixo Traseiro	
Conjunto A	180	100	1.484 (34)	2.884 (66)	4.368
Conjunto B	-	920	5.730 (69)	2.575 (31)	8.305
Trator de Apoio	160	200	1.602 (42)	2.221 (58)	3.823

Mensurou-se também a massa da carreta utilizada na colheita, com o uso das mesmas balanças de sapatas descritas anteriormente. A massa da carreta cheia de material colhido da área experimental, foi de 6.450 kg.

A área experimental foi dividida em duas partes, conforme mostrado na Figura 3. O tratamento  $T_{LU}$ , que possui o Conjunto A colheu somente a área da direita (2,14 ha) enquanto o tratamento  $T_{ATT}$ , que utilizava o Conjunto B colheu somente a área da esquerda da figura (5,15 ha). A colheita dessas duas áreas ocorreu ao mesmo tempo durante 4 dias, e não foi observada precipitação ao longo do período de colheita.

FIGURA 3 – DISTRIBUIÇÃO DOS TRATAMENTOS AO LONGO DA ÁREA EXPERIMENTAL. A ESQUERDA O TRATAMENTO  $T_{ATT}$  E A DIREITA O TRATAMENTO  $T_{LU}$

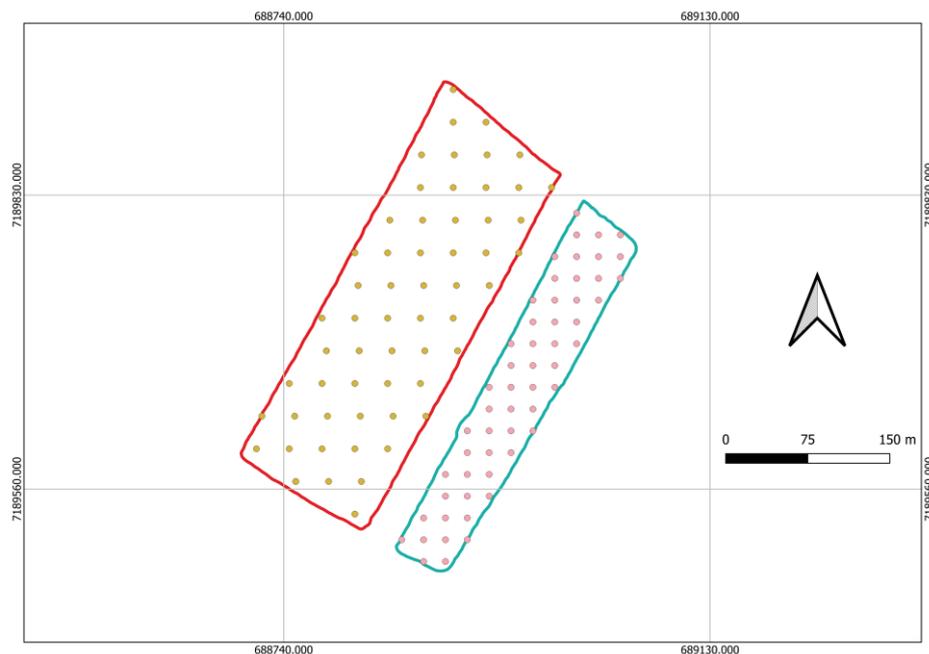


Fonte: O autor (2021)

#### 4.4.3 RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (RSP)

Vinte e quatro horas após o fim da colheita na área experimental, cada uma das áreas foi georreferenciada e dividida em grids quadrados, de 30 x 30 m para o tratamento  $T_{ATT}$  e 20 x 20 m para o tratamento  $T_{LU}$ , gerando 59 pontos amostrais para o tratamento  $T_{ATT}$  e 55 pontos amostrais para o tratamento  $T_{LU}$  (Figura 4)

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS GRIDS AMOSTRAIS USADOS NA ÁREA DE ESTUDO, PARA OS TRATAMENTOS T<sub>ATT</sub> A ESQUERDA T<sub>LU</sub> A DIREITA.



Fonte: O autor (2021)

Para avaliação da RSP, foi utilizado penetrômetro eletrônico da marca Falker, modelo PLG 1020. Este equipamento foi configurado para realizar leituras a cada 0,01 m até a profundidade de 0,4 m. O cone utilizado foi do tipo 2, com diâmetro de 12,83 mm e ângulo de 30°, e a velocidade de inserção da haste de 0,02 m s<sup>-1</sup>, seguindo o estabelecido pela norma S313.3 (ASABE, 2012). Quando a velocidade de inserção da haste passava de 0,03 m s<sup>-1</sup> o equipamento registrava um erro e a medição era refeita.

O GNSS portátil usado para fazer o georreferenciamento das áreas de trabalho em conjunto com o penetrômetro eletrônico foi o modelo GPSMAP 64S da marca Garmin. Este GPS possui receptor GPS/GLONASS de alta sensibilidade com antena quadhelix para aumentar a recepção do sinal. Este dispositivo, trabalhou com o Datum WGS84.

Em cada um dos pontos amostrais gerados pelo grid, foram coletadas 10 subamostras distantes até três metros do ponto georreferenciado. Todas estas coletas levaram dois dias, para as duas áreas.

#### 4.4.4 GRANULOMETRIA E UMIDADE GRAVIMÉTRICA

Para determinação da granulometria do solo e umidade gravimétrica, foram coletadas amostras na área experimental, em quatro trincheiras nas camadas de 0 – 0,1 m; 0,1 – 0,2 m; 0,2 – 0,3 m e 0,3 – 0,4 m nas duas áreas de colheita, no mesmo momento em que se coletava os dados de RSP.

As amostras relacionadas a granulometria foram acondicionadas em recipiente apropriado e levadas ao laboratório AgroTecSolo, localizado no município de Campo Largo, Região Metropolitana de Curitiba. Neste laboratório, as amostras foram submetidas a análise pelo método do Densímetro de Bouyoucos, proposto por Gee e Bauder (1986).

Já as amostras utilizadas para o cálculo da umidade gravimétrica foram acondicionadas em recipiente apropriado e levadas ao Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), pesadas e colocadas em estufa a temperatura de 105°C até atingirem massa constante. Para os cálculos foi utilizado a Eq. 1.

$$UG = \frac{(MU - MS)}{MS} \quad (1)$$

em que,

UG – Umidade Gravimétrica, kg kg<sup>-1</sup>

MU – Massa de solo úmido, kg

MS – Massa de solo seco, kg

Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 3.

TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL

	Camada	Argila g kg <sup>-1</sup>	Silte g kg <sup>-1</sup>	Areia g kg <sup>-1</sup>	Umidade Gravimétrica kg kg <sup>-1</sup>
T <sub>ATT</sub>	0 – 0,1 m	320	260	420	0,18
	0,1 – 0,2 m	300	260	440	0,24
	0,2 – 0,3 m	310	260	430	0,32
	0,3 – 0,4 m	340	260	400	0,36
T <sub>LU</sub>	0 – 0,1 m	330	280	390	0,21
	0,1 – 0,2 m	320	270	410	0,27
	0,2 – 0,3 m	350	230	420	0,34
	0,3 – 0,4 m	300	270	430	0,36

Em posse da caracterização granulométrica, e com o uso do triângulo textural para classificação dos solos brasileiros (SANTOS et al., 2005) pode-se determinar que a classe textural do solo da área de estudo é franco-argilosa.

#### 4.4.5 ANÁLISE DE DADOS

Os dados foram submetidos a análise descritiva, composta dos cálculos de medidas de tendência central (média aritmética, mediana e moda), de dispersão (amplitude, desvio-padrão e coeficiente de variação), de assimetria e curtose. Valores adotados para o coeficiente de assimetria foram:  $C_s < 0$ , distribuição assimétrica à esquerda;  $C_s > 0$ , distribuição assimétrica à direita e  $C_s = 0$  distribuição simétrica. Para o coeficiente de curtose foram  $C_k > 0$ , distribuição mais afilada que a normal (leptocúrtica);  $C_k < 0$ , distribuição mais achatada que a normal (platicúrtica) e  $C_k = 0$  distribuição normal (mesocúrtica). Foi realizado também o teste de Jarque-Bera para caracterizar a normalidade dos dados (TORMAN et al., 2012).

Os dados foram interpolados pelo método da ponderação pelo inverso das distâncias (IDW). A interpolação por IDW é um processo puramente matemático, no qual os dados são ponderados de forma que com o aumento da distância sua

influência diminui, sendo o fator peso determinado pelo valor da potencia escolhida, o qual neste trabalho utilizou-se o valor de 2,0.

#### 4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em relação ao teste de normalidade, todas as variáveis apresentaram distribuição normal (TABELA 4), não necessitando de transformação das médias, devido à normalidade dos resíduos das variâncias.

TABELA 4 – PARÂMETROS DE ESTATISTICA DESCRITIVA PARA A RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (Mpa)

	Prof.	Me	Md	Mo	Amp	DPad	CV	Assim	Curt	JB
T <sub>ATT</sub>	0 – 0,1	2,57	2,55	2,49	1,54	0,35	13,53	0,19	-0,21	0,46 <sup>N</sup>
	0,1 – 0,2	2,76	2,72	2,51	1,33	0,34	12,18	0,36	-0,64	2,28 <sup>N</sup>
	0,2 – 0,3	2,51	2,54	2,53	1,58	0,36	14,21	-0,25	-0,39	0,99 <sup>N</sup>
	0,3 – 0,4	2,31	2,36	1,90	1,69	0,41	17,91	-0,08	-0,70	1,27 <sup>N</sup>
T <sub>LU</sub>	0 – 0,1	2,09	2,07	2,23	1,23	0,28	13,53	0,21	-0,24	0,54 <sup>N</sup>
	0,1 – 0,2	2,20	2,23	2,26	1,41	0,29	13,21	-0,08	0,35	0,34 <sup>N</sup>
	0,2 – 0,3	2,16	2,15	2,23	1,30	0,25	11,45	0,03	0,46	0,49 <sup>N</sup>
	0,3 – 0,4	1,96	1,95	1,95	1,19	0,27	13,69	0,30	-0,38	1,16 <sup>N</sup>

T<sub>ATT</sub>: Colheita com o conjunto com colhedora de área total, T<sub>LU</sub>: colheita com conjunto de linha única, Prof.: profundidade – m, Me: média; Md: Mediana; Mo: Moda; Amp: amplitude, DPad: desvio-padrão, CV: coeficiente de variação - (%), Assim: coeficiente de assimetria, Curt: coeficiente de curtose, JB – Teste de normalidade de Jarque-Bera (N: Distribuição Normal; A: Distribuição anormal a 5%)

Os valores médios de RSP em todas as camadas avaliadas, com exceção de 0,3 – 0,4 m para o tratamento T<sub>LU</sub> são classificados por Beutler et al., (2001) como “Alto”, faixa compreendida entre 2 e 4 Mpa, sendo o maior valor médio obtido na camada de 0,1 a 0,2m (2,76MPa) no tratamento que utilizou a colhedora de forragem frontal aliado ao transbordo para descarga (T<sub>ATT</sub>). Nota-se em todas as camadas que T<sub>ATT</sub> apresentou valores de média de RSP superiores em relação ao outro tratamento.

O incremento da resistência a penetração na camada superficial do solo, até 0,25m de profundidade está relacionada a pressão exercida pelo rodado na superfície, enquanto na subsuperfície está mais relacionado a carga no eixo das

máquinas (FLORES et al., 2007). Ao observar a maior profundidade avaliada, o valor médio da RSP foi 17,8% maior no tratamento  $T_{ATT}$  em relação ao  $T_{LU}$ , haja visto que o conjunto com a colhedora frontal possuía quase o dobro da massa do conjunto que utilizou a colhedora de linha única, além do conjunto de apoio que se deslocava lateralmente, aumentando ainda mais o dano ocasionado ao solo.

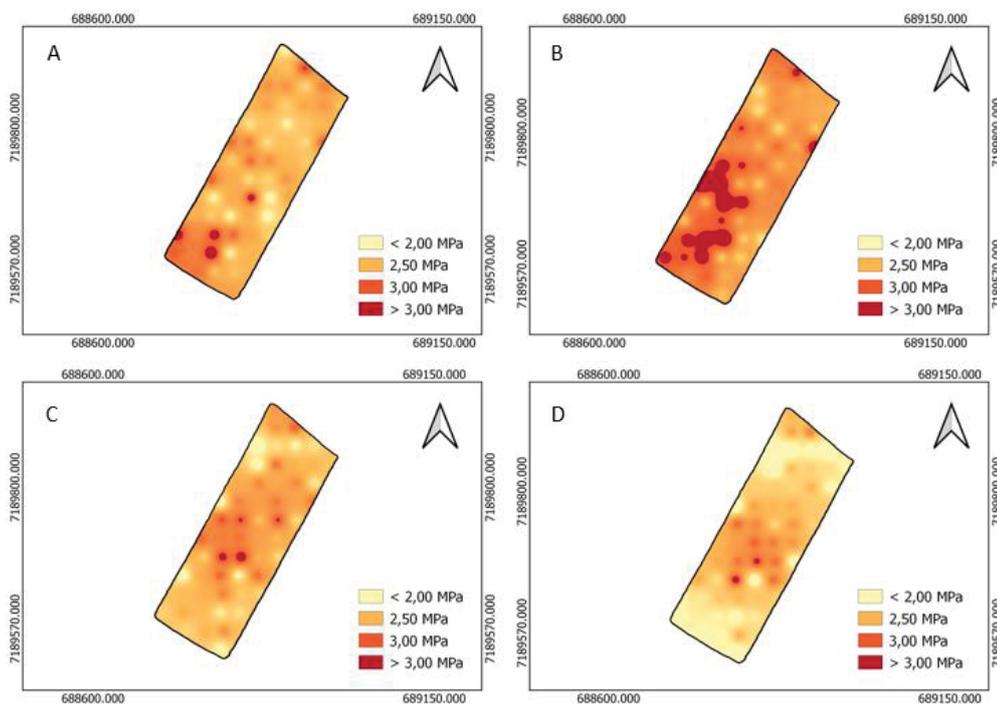
O coeficiente de variação oscilou entre 11,45 e 17,91, sendo tais valores classificados por Warrick e Nielsen (1980) como baixo (quando menores que 12%) e médio (quando entre 12 e 60%). Pias et al., (2018) obteve valores inferiores para o CV na RSP com esse número de subamostras, porém ressalta que maiores valores deste coeficiente indicam existência de maior variabilidade espacial para esse atributo na área (OLIVEIRA et al., 2015)

A colheita com o conjunto de área total, apresentou nos primeiros 0,2 m de profundidade valores de assimetria de 0,19 e 0,36, indicando que a sinuosidade da curva é maior do lado direito, confirmando pelas medias inferiores as medias. Tal comportamento foi observado também na colheita com o conjunto de linha única em todas as profundidades exceto em 0,1-0,2 m. Para o tratamento  $T_{ATT}$  nas profundidades de 0,2-0,3 e 0,3-0,3m e para o  $T_{LU}$  em 0,1-0,2 m os valores de assimetria foram negativos indicando que a distribuição é assimétrica a esquerda.

A curtose foi negativa em todas as camadas do  $T_{ATT}$  e na camada 0-0,1 e 0,3-0,4 no  $T_{LU}$ , indicando uma curva mais achatada (platicúrtica), com menor concentração dos valores de RSP em torno do centro. A camada de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 no tratamento  $T_{LU}$  apresentou comportamento de distribuição em curva mais fechada (leptocúrtica) com maior concentração dos valores de RSP em torno do centro.

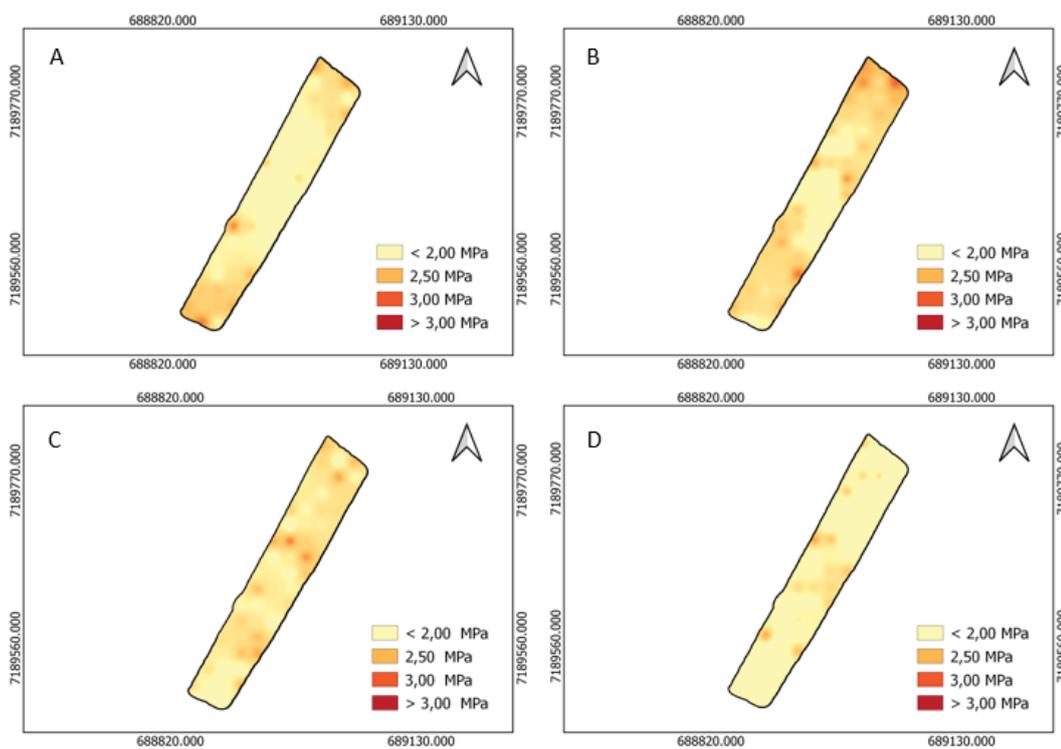
Na Figura 5 e 6 são apresentados os mapas interpolados para os tratamentos  $T_{ATT}$  e  $T_{LU}$  nas profundidades avaliadas.

FIGURA 5 – MAPA TEMÁTICO DA RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (RSP) NAS CAMADAS 0-0,1 M (A), 0,1-0,2 M (B), 0,2-0,3M (C) E 0,3-0,4M (D) PARA O TRATAMENTO T<sub>ATT</sub>,



Fonte: O autor (2021)

FIGURA 6 – MAPA TEMÁTICO DA RESISTENCIA DO SOLO A PENETRAÇÃO (RSP) NAS CAMADAS 0-0,1 M (A), 0,1-0,2 M (B), 0,2-0,3M (C) E 0,3-0,4M (D) PARA O TRATAMENTO T<sub>LU</sub>,



Fonte: O autor (2021)

Ao observar os mapas temáticos gerados, nota-se que o tráfego de máquinas na colheita com a forrageira frontal aliado ao conjunto transbordo ( $T_{ATT}$ ) promove incremento na RSP em todas as camadas avaliadas, em alguns pontos com valores de resistência superiores a 3,0 MPa, principalmente na camada superficial. A colhedora de linha única ( $T_{LU}$ ) promoveu menor resistência do solo a penetração, estando boa parte da área com valores inferiores a 2,0 MPa. Valores abaixo de 2,0 MPa são considerados por Silva et al, (2004) como não limitantes ao desenvolvimento radicular da maioria das culturas,

Na camada de 0,1-0,2 m nota-se nos dois tratamentos avaliados um incremento na RSP, no qual é atingido os maiores valores de média para este parâmetro. Áreas que possuem preparo primário de solo, como é o caso da área de estudo, tendem a acumular as cargas dos implementos e maquinários utilizados no preparo de solo, como descritos por Oliveira et al., (2017), evidenciando incremento na RSP acumulada a carga sofrida no momento da colheita. Nesta profundidade é altamente recomendável o processo de descompactação, seja de forma biológica ou mecanizada, como forma de promover bom desenvolvimento radicular da cultura mesmo em condições de baixa umidade

#### 4.6 CONCLUSÕES

- O conjunto de colheita frontal promove a maior resistência do solo a penetração (RSP), que pode acarretar restrição ao crescimento radicular.
- Os maiores valores e RSP ocorrem na camada 0,10-0,20 m, independente do conjunto de colheita utilizado

## 4.7 REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22: 711–729, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. St. Joseph, 2012. (ASABE standard: S313.3)

BATISTA P. H. D. et al. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração e teor de água em Neossolo cultivado com banana no Agreste Pernambucano. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, p. 54-60, 2019.

BETZEK, N. M. et al. Computational routines for the automatic selection of the best parameters used by interpolation methods to create thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v, 157, p, 49-62, 2019.

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

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, n. 4, p. 1501-1511, 1994.

CAMPAGNON, A. M. et al. Variabilidades especial da Resistencia mecânica do solo a penetração na colheita mecanizada de milho para silagem. **Científica**, v. 8, n. 2, p, 1-12, 2020.

CARRARA, M. et al. Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. **Geoderma**, v. 142, n. 3–4, p. 294–307, 2007.

CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agronômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.

CARVALHO, J.R.P. de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1151-1159, 2002

DUTTMANN, R. et al. Predicting Soil Compaction Risks Related to Field Traffic during Silage Maize Harvest. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 2, p. 408, 2014.

FERRARETTO, L.F.; SHAVER, R. D.; LUCK, B. D. Silage review: Recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting, **Journal of Dairy Science**, v. 101, n. 5, p. 3937–3951, 2018.

FLORES, J.P.C.; et al.. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.31, p.771-780, 2007.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W., Particle-size analysis. In **Methods of soil analysis**. Part 1. 2 ed. Agronomy Monographs. Madison, 1986, p. 383–411.

LAMANDÉ, M.; GREVE, M. H.; SCHJØNNING, P. Risk assessment of soil compaction in Europe – Rubber tracks or wheels on machinery. **Catena**, v. 167, p. 353–362, 2018.

MATIAS. S. S. R. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@ambiente**. v. 9. n. 1, p. 17-26, 2015.

MELO, D. de. et al. Soil compaction in areas of maize used for silage with the application of wastewater. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 2, p. 205–215, 2019.

MONTGOMERY. D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro. LTC. 2004. 532 p.

NAGAHAMA, H. DE J. et al. Comunicação Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agronômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 741–746, 2016.

OLIVEIRA, I. A.; Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015

OLIVEIRA, M. P.; et al., Efeito residual da gessagem e calagem na resistência à penetração obtida com dois penetrômetros em diferentes sistemas de manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n. 1, p. 58-64, 2017.

OLIVEIRA FILHO F.X., et al. Zonas de manejo para preparo de solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 186-193, 2015.

PIAS, O. H. de C. Soil penetration resistance mapping quality: effect of the number of subsamples. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, p. 1-11, 2018

RAWLS. W. J.; et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**. v. 116, n. 1, p. 61-76, 2003.

SANTOS, R.D. et al., **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 5th ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Embrapa, Rio de Janeiro, 2005

SILVA. V. R.; REICHERT. J. M.; REINERT. D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Revista Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

STORCK. L.. et al. Sampling plan for using a motorized penetrometer in soil compaction evaluation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 250-255. 2015.

SVORAY, T. et al. Mapping soil health over large agriculturally important areas. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 5, p. 1420–1434, 2015.

TORMAN. V. B.; COSTER. R.; RIBOLDI. J.; Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **HCPA**. V. 32. n. 2. p. 227-234. 2012

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

## 5 CONCLUSÃO GERAL

Conjuntos com maiores larguras de trabalho, mesmo trafegando em velocidades de deslocamento menores, promovem maior eficiência energética na colheita, e não causam redução da porosidade do solo em relação a colhedora de linha única.

A utilização de conjunto transbordo na colheita com o conjunto de área total, promove melhor eficiência energética, e não difere em relação ao dano ocasionado as propriedades físicas do solo em relação a sua não utilização na colheita.

A resistência do solo a penetração foi influenciada pelo tráfego de máquinas na área de colheita, e o conjunto de área total promoveu maior resistência na área em relação a colhedora de linha única, e maior densidade do solo em relação ao momento prévio a colheita.

## 6 REFERÊNCIAS

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22: 711–729, 2014.

ARALDI, P.F. et al. Operational efficiency in mechanized harvesting in irrigated rice fields. **Ciência Rural**, 43 (3): 445–451, 2013.

ASABE American Society of Agricultural Biological Engineers. ASABE EP 496.3: Agricultural machinery management data. In: \_\_\_\_\_. **ASABE Standards 2011: standards engineering practices data**. St. Joseph, 2011. 6 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. St. Joseph, 2012. (ASABE standard: S313.3)

ASABE American Society of Agricultural Biological Engineers. ASABE D497.7: Agricultural machinery management data. In: \_\_\_\_\_. **ASABE Standards: standards engineering practices data**. St. Joseph, 2015. 9 p.

BAL, M.A. et al. Crop processing and chop length of corn silage: effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 83, p. 1264-1273, 2000.

BARAN, M. F.; GOKDOGAN, O. Comparison of energy use efficiency of different tillage methods on the secondary crop corn silage production. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 25, n. 9, p. 3808–3814, 2016

BARCELOS, A. F. et al., Valor nutritivo e características fermentativas da silagem de capim-elefante com diferentes proporções de casca de café. **Ciência Animal Brasileira**, v. 19, n. 19, p. 1–12, 2018.

BATISTA P. H. D. et al. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração e teor de água em Neossolo cultivado com banana no Agreste Pernambucano. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, p. 54-60, 2019.

BERISSO, F. E. et al., Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, v. 131, p. 36-46, 2013

BETZEK, N. M. et al. Computational routines for the automatic selection of the best parameters used by interpolation methods to create thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 49-62, 2019.

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

BOTTA G.F. et al., Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. **Soil Tillage Research**, v.101, p. 44-51, 2008

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. Pearson Education, 2008.

BRÜNING, D. et al. Effect of compaction, delayed sealing and aerobic exposure on maize silage quality and on formation of volatile organic compounds. **Grass and Forage Science**, 73 (1): 53–66, 2017.

BUSATO, P. et al. Optimisation tool for logistics operations in silage production. **Biosystems Engineering**, 180: 146–160, 2019.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, n. 4, p. 1501-1511, 1994.

CAMBI, M., et al. Impact of wheeled and tracked tractors on soil physical properties in a mixed conifer stand. **IForest**, v. 9, p. 89–94, 2016.

CAMPAGNON, A. M. et al. Variabilidades especial da Resistencia mecânica do solo a penetração na colheita mecanizada de milho para silagem. **Científica**, v. 8, n. 2, p. 1-12, 2020.

CARRARA, M. et al. Mapping of penetrometer resistance in relation to tractor traffic using multivariate geostatistics. **Geoderma**, v. 142, n. 3–4, p. 294–307, 2007.

CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agrônômicas da cultura do café. **Coffee Science**, v. 8, n. 3, p. 265-275, 2013.

CARVALHO, J.R.P. de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1151-1159, 2002

CAVALLO, E.; FERRARI, E.; COCCIA, M. Likely technological trajectories in agricultural tractors by analysing innovative attitudes of farmers. **International Journal of Technology, Policy and Management**, v. 15, n. 2, p. 158, 2015.

CORTEZ, J. W. et al., Atributos físicos do solo em sistemas de adubação e de manejo de resíduos culturais em plantio direto. **Agrarian**, v. 11, n. 42, p. 343–351, 2018.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 20, p.175- 182, 1996.

D'OR, D.; DESTAIN, M. F. Risk Assessment of Soil Compaction in the Walloon Region in Belgium. **Mathematical Geosciences**, v. 48, n. 1, p. 89–103, 2016.

DUTTMANN, R. et al. Predicting Soil Compaction Risks Related to Field Traffic during Silage Maize Harvest. **Soil Science Society of America Journal**, v. 78, n. 2, p. 408, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Pesquisa de Solos: Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3 ed. Revista e Ampliada. EMBRAPA solos, Brasília, 577 p., 2017.

FARIAS, M. et al. Desempenho operacional e energético de um trator agrícola durante operação de gradagem. **Tecno-Lógica**, 22 (2): 213–216, 2018.

FEITOSA, E.O. et al. Analysis of costs and profitability in irrigated papaya production in semiarid. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 12: 2293–2304, 2018.

FERRARETTO, L.F.; SHAVER, R. D.; LUCK, B. D. Silage review: Recent advances and future technologies for whole-plant and fractionated corn silage harvesting. **Journal of Dairy Science**, 101 (5): 3937–3951, 2018.

FERREIRA, P.V. **Estatística experimental aplicada as ciências agrárias**. Viçosa: UFV, 2018, 126 p.

FILIPOVIC, D. et al. Effects of tractor bias-ply tyre inflation pressure on stress distribution in silty loam soil. **Soil and Water Research**, v. 11, n. 3, p. 190–195, 2016.

FLORES, J.P.C.; et al.. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.31, p.771-780, 2007.

FRANCETO, T. R. et al., Tráfego de máquinas agrícolas e alterações na densidade do solo e porosidade total de um argissolo vermelho em área sob videira. **XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA**; Campo Grande. 2014.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W., Particle-size analysis. In **Methods of soil analysis**. Part 1. 2 ed. Agronomy Monographs. Madison, 1986, p. 383–411.

HARMON, J.; LUCK, B. Data recording methods and time-motion analysis of the forage harvest process. 2016 **American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting**, ASABE 2016, v. 7004, p. 1–11, 2016.

HE, P. et al. Reducing agricultural fuel consumption by minimizing inefficiencies. **Journal of Cleaner Production**, 236: 1-13, 2019.

JASPER, S.P. et al. Tractor performance of power 157 kW on condition manual and automatic gears of management. **Scientia Agraria**, 17 (3): 55–60, 2016.

JEMISON, J. M. et al., Soil Health of Recently Converted No-till Corn Fields in Maine. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, p. 1–13, 2019. Taylor & Francis.

KASSIE, M. et al. Measuring farm and market level economic impacts of improved maize production technologies in Ethiopia: Evidence from panel data. **Journal of Agricultural Economics**, 69 (1): 76–95, 2017.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.

KIM, Y.-J.; CHUNG, S.-O.; CHOI, C.-H.; Effects of gear selection of an agricultural tractor on transmission and PTO load during rotary tillage. **Soil and Tillage Research**, 134: 90–96, 2013.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.

KLEIN, J. L. et al. Desempenho produtivo de híbridos de milho para a produção de silagem da planta inteira. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n. 1, p. 101, 2018.

LAMANDÉ, M.; GREVE, M. H.; SCHJØNNING, P. Risk assessment of soil compaction in Europe – Rubber tracks or wheels on machinery. **Catena**, v. 167, p. 353–362, 2018.

LANES, E. C. DE M.; et al. Silagem de milho como alimento para o período da estiagem: como produzir e garantir boa qualidade. **CES Revista**, 2006.

LANZANOVA, M. E. et al., Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1131- 1140, 2007.

LEES K.J., et al., The effects of soil compaction mitigation on below-ground fauna: How earthworms respond to mechanical loosening and power harrow cultivation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 273-282. 2016

LESPCH, Igor F. **19 lições de pedologia**. Oficina de textos, 2011.

LINHARES, A. J. de S. et al., Soil compaction affects the silage quality of sunflower and Paiaguas palisadegrass (*Brachiaria brizantha*) grown on a Latosol in the Brazilian savana. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 7, p. 1121-1130, 2020

LOVARELLI, D.; FIALA, M.; LARSSON, G.; Fuel consumption and exhaust emissions during on-field tractor activity: A possible improving strategy for the environmental load of agricultural mechanization. **Computers and Electronics in Agriculture**, 151: 238–248, 2018.

MACRÌ, G. et al. Evaluation of soil compaction caused by passages of farm tractor in a forest in southern Italy. **Agronomy Research**, v. 15, n. 2, p. 478–489, 2017

MAHL, D. et al. Seeder energetic demand and distribution efficiency of corn seeds under speed variation and soil condition. **Engenharia Agrícola**, 24 (1): 150–157, 2004.

MARTINS, M.B. et al. Energy optimization of an agricultural tractor using technical standards in harrowing operations. **Engenharia na Agricultura**, 26 (1): 52–57, 2018.

MATIAS, S. S. R. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agro@ambiente**. v. 9. n. 1, p. 17-26, 2015.

MELO, D. de. et al. Soil compaction in areas of maize used for silage with the application of wastewater. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 2, p. 205–215, 2019

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Editora Ceres, 1974, 301 p.

MIALHE LG. **Máquinas motoras na agricultura**. 2 ed. São Paulo: 1980.

MILLS, J.A.; KUNG JR., L. The effect of delayed ensiling and application of a propionic acid-based additive on the fermentation of barley silage. **Journal of Dairy Science**, 85 (8): 1969–1975, 2002.

MOLIN, J.P.; DIAS, C.T.S.; CARBONERA, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.16, n.5, p. 584-590,2012.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 532 p.

MORAES M.T., et al., Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil Tillage Research** v. 200, n. 6, p. 1-14, 2020

NAGAHAMA, H. DE J.; et al., Comunicação Efeitos da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e agrônômicos do capim elefante. **Revista Ceres**, v. 63, n. 5, p. 741–746, 2016.

OBRYCKI, J. F. et al. Corn Stover Harvest, Tillage, and Cover Crop Effects on Soil Health Indicators. **Soil Science Society of America Journal**, v. 82, n. 4, p. 910, 2018.

OLIVEIRA, I. A.; Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015

OLIVEIRA, M. P.; et al., Efeito residual da gessagem e calagem na resistência à penetração obtida com dois penetrômetros em diferentes sistemas de manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n. 1, p. 58-64, 2017.

OLIVEIRA FILHO F.X., et al. Zonas de manejo para preparo de solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 186-193, 2015.

PERES, J. G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A.; Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30; n. 5; p. 875-886, 2010.

PIAS, O. H. de C. Soil penetration resistance mapping quality: effect of the number of subsamples. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, p. 1-11, 2018

RAMOS, C.R.G. et al. Fuel consumption of a sugarcane harvester in different operational settings. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 20 (6): 588–592, 2016.

RAWLS. W. J.; et al. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**. v. 116, n. 1, p. 61-76, 2003.

RENČÍN, L.; POLCAR, A.; BAUER, F. The Effect of the Tractor Tires Load on the Ground Loading Pressure. **Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis**, v. 65, n. 5, p. 1607–1614, 2017.

REICHARDT, K. & TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. São Paulo, Manole, 2004.

ROEBER, J.B. et al. Tractor power take-off torque measurement and data acquisition system. **Applied Engineering in Agriculture**, 33 (5): 679–686, 2017.

SAH, R. P.; TIWANA, U. S.; KUMAR, B.; Evaluation of normal and specialty corn for fodder yield and quality traits. **Range Management and Agroforestry**, v.37, p. 79-83, 2016

SALIRE, E.V.; HAMMEN, J.E.; HARDCASTLE, J.H. Compression of intact subsoils under short-duration loading. **Soil & Tillage Research**, v.31, p. 235-248, 1994.

SANTOS, R.D. et al., **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 5th ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Embrapa, Rio de Janeiro, 2005

SHAH, A. N. et al., Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 11, p. 10056–10067, 2017.

SILVA. V. R.; REICHERT. J. M.; REINERT. D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Revista Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004

SIMECKOVA, J., et al., Changes of physical properties of the soil after the passage of an agricultural tractor. **Agrophys**, v. 35, p. 97-105, 2021.

SIMIKIC, M. et al. Power delivery efficiency of a wheeled tractor at oblique drawbar force. **Soil and Tillage Research**, 141: 32–43, 2014.

SOANE, B. D.; et al., Compaction by agricultural vehicles: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 1, 207-237, 1980.

STORCK, L.. et al. Sampling plan for using a motorized penetrometer in soil compaction evaluation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 250-255, 2015.

SVORAY, T. et al. Mapping soil health over large agriculturally important areas. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 5, p. 1420–1434, 2015.

SZYMCZAK, D. A.; et al., Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de Pinus taeda L. na região Sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v.38, p. 641-648, 2014.

TAVARES, T. de O. et al. Effective power and hourly fuel consumption demanded by set tractor-coffee harvester in function of adequacy tractor ballasting. **Engenharia Agrícola**, 37 (4): 699–708, 2017.

THOMSON, A. L. et al. The effect of varying proportion and chop length of lucerne silage in a maize silage-based total mixed ration on diet digestibility and milk yield in dairy cattle. **Animal**, v. 11, p. 2211-2219, 2017

TIEPPO, R.C. et al. Modeling cost and energy demand in agricultural machinery fleets for soybean and maize cultivated using a no-tillage system. **Computers and Electronics in Agriculture**, 156: 282–292, 2019.

TOLEDO, A. de et al. Spatial behavior of energetic demand in peanut sowing in latosol under conventional tillage. **Engenharia Agrícola**, 30 (3): 459–467, 2010.

TORMAN. V. B.; COSTER. R.; RIBOLDI. J.; Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **HCPA**. V. 32. n. 2. p. 227-234. 2012

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

UNGUREANU, N.; et al., Agricultural soil compaction under the action of agricultural machinery. **Simpozu Aktualni Zadaci Mehanizacue Poljoprivrede** , Croatia, p. 31–42, 2015

VIEIRA, V.C et al., Caracterização bromatológica de silagens de milho de genótipos super precoce. **Ciencia Rural**, v. 43, p.1925-1931, 2013

VILLAMIL, M. B.; LITTLE, J.; NAFZIGER, E. D. Corn residue, tillage, and nitrogen rate effects on soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 151, p. 61–66, 2015.

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

WILKINSON, J.M.; RINNE, M. Highlights of progress in silage conservation and future perspectives. **Grass and Forage Science**, 73 (1): 40–52, 2018.

YAHYA Z., et al., Alterations of soil physical properties due to mechanization activities under oil palm on Bernam series soil. **International Journal of Agriculture Innovations and Research**, v. 3, p. 1435-1446, 2015

YANG, L.; et al. Development and application of mechanized maize harvesters. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 9, n. 3, p. 15–28, 2016.

ZEBELI, Q. et al. DROCHNER, W. Review: role of physically effective fiber and estimation of dietary fiber adequacy in high-producing dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v. 95, p. 1041-1056, 2012

