

**MICHEL DOS SANTOS MOURA**

**VARIAÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DE CONE (IC) EM ÁREAS DE CONTATO DE  
PNEUS EM TANQUE DE SOLO**

**Botucatu**

**2023**



**MICHEL DOS SANTOS MOURA**

**VARIAÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DE CONE (IC) EM ÁREAS DE CONTATO DE  
PNEUS EM TANQUE DE SOLO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

**Orientador:** Dr. Kléber Pereira Lanças

**Botucatu**

**2023**

M929v

Moura, Michel dos Santos

Variação espacial do índice de cone (IC) em áreas de contato de pneus em tanque de solo / Michel dos Santos

Moura. -- Botucatu, 2023

55 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Kléber Pereira Lanças


1. Pneus agrícolas. 2. Máquinas agrícolas. 3. Agricultura de precisão. 4. Mecanização. 5. Compactação do solo. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

VARIAÇÃO ESPACIAL DO ÍNDICE DE CONE (IC) EM ÁREAS DE CONTATO DE PNEUS EM TANQUE DE SOLO

AUTOR: MICHEL DOS SANTOS MOURA  
ORIENTADOR: KLEBER PEREIRA LANÇAS


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia  
(Energia na Agricultura), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS (Participação Presencial)  
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

  
Prof. Dr. JOÃO ALBERTO BORGES DE ARAÚJO (Participação Presencial)  
Logística e Produção / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

  
Pesquisador Dr. JOÃO VITOR PAULO TESTA (Participação Virtual)  
Especialista de Produto Global para colhedoras de cana-de-açúcar / Case IH / CNH Industrial

  
Prof. Dr. MARCELO SCANTAMBURLO DENADAI (Participação Presencial)  
Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

  
Prof. Dr. ULISSES ROCHA ANTUNIAS (Participação Presencial)  
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP

Botucatu, 29 de setembro de 2023.



A toda minha família e  
especialmente a meu filho  
Gabriel Pereira Moura.  
Dedico.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado saúde e inteligência para superar todas as dificuldades e conseguir chegar aonde hoje estou.

A minha esposa, amiga e companheira Liliane Catarina Pereira, pela ajuda, pelo estímulo, pela paciência, pelo incentivo, pela força e, principalmente, pelo carinho.

Ao meu filho Gabriel que se desenvolve como criança enquanto parte dessa tese foi desenvolvida.

De forma especial agradeço ao meu pai José e à minha mãe Carmelita, por não medirem esforços para que eu pudesse levar meus estudos adiante.

Ao meu orientador, Kléber Pereira Lanças, pela paciência, dedicação e ensinamentos que possibilitaram que eu realizasse este trabalho.

A Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu e todo seu corpo docente, além da direção e a administração, pelo excelente ambiente oferecido aos seus alunos e os profissionais qualificados que disponibiliza para nos ensinar.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante a realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Rural dessa universidade e principalmente aos meus amigos do NEMPA, por confiarem em mim e estarem ao meu lado em todos os momentos.

Sou muito grato também a todos os professores do Programa de Energia na Agricultura, que realizam seu trabalho com tanto amor e dedicação, trabalhando incansavelmente para que nós, alunos, possamos contar com um ensino de extrema qualidade.

“Meus sinceros agradecimentos a todos”



*“O sonho é que leva a gente para frente. Se a gente for seguir a razão, fica  
aquietado, acomodado.”*

*– Ariano Suassuna–*



## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de diferentes tipos de pneus na compactação do solo com rodados agrícolas. Foram utilizados 15 modelos de pneus de trator para comparar seus efeitos na compactação do solo. A proposta seria entender qual os pneus de trator causaram menor compactação do solo e qual a melhor estratégia a seguir na utilização dos pneus. Foram utilizadas estatísticas descritivas para calcular as médias e desvios padrão para todos os pontos em cada tratamento, em relação aos índices de compactação observados. Com base nessas medidas de tendência central e dispersão, foram estimados os intervalos de confiança para a variação das médias observadas em cada tratamento, considerando um nível de significância de 95% e supondo uma distribuição normal da população. Em seguida, comparou-se as médias para identificar diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Posteriormente, foram calculadas as médias e desvios padrão para cada ponto de coleta de dados, considerando todos os pontos sem distinção de tratamento. Isso permitiu analisar a compactação do solo dentro e fora da faixa de rodagem dos pneus, com um nível de significância de 95% e assumindo distribuição normal da população. Além disso, foi realizada uma análise gráfica utilizando as médias para identificar a distribuição tridimensional do índice de compactação em cada ponto de coleta. A partir dos dados obtidos, podemos concluir que diferentes grupos de pneus apresentam variação significativa nos índices de compactação para diferentes faixas de tamanho. Em alguns grupos, a diferença é estatisticamente significativa para certas faixas de tamanho, enquanto em outros grupos a diferença é significativa para apenas uma única faixa. Isso indica que as características de compactação variam dependendo do tamanho dos pneus. Além disso, a análise de correlação indica que não existe uma correlação significativa entre os índices de compactação e as larguras dos pneus, assim como em relação aos seus raios. Isso significa que a largura e o raio dos pneus não estão relacionados de forma significativa com a capacidade de compactação dos mesmos. Essas conclusões científicas nos permitem entender melhor as relações entre o tamanho dos pneus e suas características de compactação. Isso pode ser útil para o desenvolvimento e aprimoramento de pneus, levando em consideração os diferentes tamanhos e suas necessidades específicas de compactação.

**Palavras-chave:** mecanização; compactação; pneus; rodados.



## **ABSTRACT**

This work had as objective to study the behavior of different types of tires in the compaction of soils with sets of agricultural wheels. Fifteen models of tractor tires were used to compare their effects on soil compaction. The proposal would be to understand which tractor tires caused less soil compaction and what is the best strategy to follow in the use of tires. Descriptive statistics were used to calculate the means and standard deviations of all points in each treatment, in relation to the observed compaction indices. Based on these measures of central tendency and dispersion, confidence intervals were estimated for the variation of the means observed in each treatment, considering a significance level of 95% and assuming a normal distribution of the population. Then, the means were compared to identify statistically significant differences between treatments. Subsequently, the means and standard deviations were calculated for each data collection point, considering all the points without distinction of treatment. This allowed the analysis of soil compaction inside and outside the tire tread, with a significance level of 95% and assuming a normal population distribution. In addition, a graphical analysis was performed using the averages to identify the three-dimensional distribution of the compaction index at each collection point. From the data obtained, we can conclude that different groups of tires present a significant variation in compaction indices for different size ranges. In some groups the difference is statistically significant for certain size ranges, while in other groups the difference is significant for only a single range. This indicates that compaction characteristics vary by tire size. In addition, the correlation analysis indicates that there is no significant correlation between the compaction indexes and the widths of the tires, as well as in relation to their radii. This means that the width and radius of the tires are not significantly related to their compaction capacity. These scientific conclusions allow us to better understand the relationships between tire size and its compaction characteristics. This can be useful for the development and improvement of tires, taking into account the different sizes and their specific compaction needs.

**Keywords:** mechanization; compression; tires; rotated.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP) .....   | 37 |
| Figura 2 - Tanque de solo .....   | 39 |
| Figura 3 - Instrumentação do <i>Scanner Laser</i> (UFEP).....   | 40 |
| Figura 4 - Mapa gerado após análise e tratamento de dados.....  | 41 |
| Figura 5 - Resistência à penetração do solo (Penetrômetro).....   | 41 |
| Figura 6 - Pontos amostrais do “Penetrômetro” na área de contato pneu/solo .....  | 42 |
| Figura 7 - Descrição dos pontos de coleta em cada tratamento .....  | 45 |
| Figura 8 - Distribuição média do índice de compactação em cada ponto de coleta, para um nível de significância de 95% e pressupondo distribuição normal da população..... | 48 |
| Figura 9 - Estimativa do polinômio explicativo da distribuição média do índice de compactação em cada faixa ao longo da superfície de rodagem .....                       | 49 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Análise física do latossolo vermelho amarelo (Botucatu-2023).....  | 38 |
| Tabela 2 - Análise comparativa da média dos índices de compactação, para um nível de significância de 95% e pressupondo distribuição normal da população (por tratamento).....                  | 46 |
| Tabela 3 - Análise comparativa da média dos índices de compactação, para um nível de significância de 95% e pressupondo distribuição normal da população (por grupos de medidas dos pneus)..... | 46 |



## SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>21</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                               | <b>23</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Operações mecanizadas no solo .....</b>                      | <b>23</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Compactação do solo.....</b>                                 | <b>24</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Resistência à penetração do solo .....</b>                   | <b>26</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Tecnologia de precisão .....</b>                             | <b>28</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Uso dos pneus na agricultura .....</b>                       | <b>30</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Uso de telemetria na agricultura .....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>2.7</b> | <b>Uso de GPS em máquinas agrícolas .....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>2.8</b> | <b>Tráfego controlado de máquinas agrícolas .....</b>           | <b>33</b> |
| <b>3</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                                  | <b>37</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP) .....</b>             | <b>37</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Ensaio de Superfície Deformável (ESD).....</b>               | <b>38</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Perfilômetro digital (<i>Scanner Laser</i>) – UFEP .....</b> | <b>40</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Penetrômetro eletromecânico .....</b>                        | <b>41</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Teor de umidade e Densidade do solo .....</b>                | <b>42</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Análise Estatística .....</b>                                | <b>43</b> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                             | <b>45</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Amostras .....</b>   | <b>45</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Análise dos Dados.....</b>                                   | <b>47</b> |
| <b>5</b>   | <b>CONCLUSÃO.....</b>   | <b>50</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>51</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

A busca constante pelo aumento da produtividade de culturas agrícolas vem se mostrando como um fator chave para o avanço do agronegócio brasileiro. Dentro deste contexto, inserem-se o desenvolvimento de tecnologias, estando estas presente em materiais genéticos, adubos, produtos químicos e na mecanização, sendo que a combinação destes fatores atrelados a condições climáticas torna possível a obtenção de altas produtividades de culturas agrícolas.

O aumento do peso dos equipamentos mecanizados em contato com o solo afeta diretamente sua estrutura física. Isso faz com que o crescimento das sistema radicular das plantas diminui. O problema da condensação é intensificado em culturas de ciclo semi-perene como a cana-de-açúcar, pois, nesses casos, os efeitos da condensação duram várias safras, afetando sua produtividade.

O principal método que uma máquina usa para converter a potência disponível do motor em potência de tração e trabalho útil é por meio da interação entre a roda e o solo; No entanto, são poucos os estudos que avaliam quantitativamente essa interação nas condições agrícolas brasileiras, provando o desconhecimento dos fatores relevantes para a manutenção da estrutura do solo e aumento da produtividade.

Existem vários modelos de rodados. No entanto, o tipo mais pneumático consiste em rodas de aço e pneus de borracha. Modelo de design de pneu agrícola A estrutura interna e a deformabilidade são fatores que afetam a adesão mecânica e o impacto do solo ao longo do tempo. pneus mais largos foram introduzidos no setor canavieiro para aumentar a área de contato entre o pneu e o solo e reduzir a pressão; entretanto, novas tecnologias construtivas estão se expandindo, com modelos mais estreitos, principalmente para aplicação do conceito de agricultura de precisão no controle de tráfego de máquinas.

A agricultura de precisão é uma técnica que tem sido cada vez mais utilizada no setor agrícola, com o objetivo de aumentar a produtividade e reduzir os custos. Uma das principais ferramentas utilizadas na agricultura de precisão é o tráfego controlado, que consiste em definir as rotas de trânsito das máquinas agrícolas de forma a minimizar o impacto no solo.

O uso do tráfego controlado permite um maior controle das máquinas sobre o solo, reduzindo a compactação e aumentando a infiltração de água e nutrientes. Com

isso, é possível obter uma menor área compactada e uma maior eficiência e qualidade no trabalho e uma uniformidade na distribuição de insumos, como fertilizantes e defensivos agrícolas, o que resulta em uma melhor qualidade e produtividade das culturas.

Além disso, o tráfego controlado também contribui para a redução dos custos de produção, uma vez que diminui a necessidade de manutenção do solo e o consumo de combustível das máquinas agrícolas.

Por isso, a introdução do tráfego controlado na agricultura de precisão é uma tendência que vem ganhando cada vez mais espaço no setor agrícola, contribuindo para uma produção mais sustentável e eficiente.

Existem diversos tipos de pneus no mercado, cada um com suas características específicas. Por isso, é importante avaliar as necessidades da operação agrícola e escolher o pneu mais adequado para cada situação. Alguns dos fatores que devem ser considerados na escolha do pneu são a largura, o perfil, o tipo de composto e a pressão de inflação.

No entanto, apesar dos benefícios do controle de tráfego, ainda existem muitos desafios a serem enfrentados para sua implementação. Um dos principais desafios é a falta de conhecimento dos agricultores sobre a técnica, o que pode dificultar sua adoção. Além disso, o controle de tráfego também exige investimentos em tecnologia, como por exemplo, a aquisição de equipamentos para monitorar a compactação do solo e o uso de pneus com baixa pressão.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Operações mecanizadas no solo

Segundo Vian *et al.* (2015), a mecanização agrícola é o processo de utilização total ou semi-integral de máquinas no campo, a fim de operar no desempenho total ou parcial das operações agrícolas. Os autores observaram que o portfólio de produtos é dominado por empresas de máquinas agrícolas voltadas para o cultivo de cereais, o que pode ser explicado pelo pioneirismo dessas hortaliças na adoção de sistemas mecanizados.

As lavouras permanentes como café, laranja e uva, assim como as semipermanentes como a cana-de-açúcar, tiveram um processo tardio de mecanização em relação às culturas tradicionais de cereais, esse processo de atraso ocorreu principalmente em países com menor desenvolvimento econômico. Vian *et al.* (2015) relacionam esse fato principalmente ao baixo preço e à abundante disponibilidade de mão de obra nos países em desenvolvimento.

A crescente mecanização da colheita da cana-de-açúcar se deve à necessidade de reduzir as queimadas por exigências ambientais e legais, bem como pela escassez de mão de obra rural. Dessa forma, o tamanho da produção de cana-de-açúcar no cenário brasileiro e mundial tem levado as principais empresas de maquinário a desenvolverem soluções específicas para a cultura.

Houve novas fusões de negócios no setor industrial e de manufatura, atualmente o Brasil está entre os maiores fabricantes de máquinas da América Latina, abriga empresas internacionais e está passando de importador na década de 1970 para exportador de máquinas hoje (Vian *et al.*, 2015).

A mecanização agrícola na cultura da cana-de-açúcar trouxe desafios relacionados à formação de um contingente significativo de trabalhadores rurais que necessitavam de capacitação para trabalhar com máquinas (Nastari, 2015).

Igualmente importantes são os desafios associados ao controle da qualidade do corte básico da cultura, evitando a redução da vida útil dos canaviais e também reduzindo a compactação do solo causada pela operação de máquinas de alto peso específico.

A cana-de-açúcar, desde a implantação até a colheita, é uma das culturas que

mais sofre com a passagem de máquinas, fato que se torna crítico por ser uma cultura semipermanente com vários cortes na mesma área agrícola sem preparo anual do solo.

Na técnica manual de colheita e corte da cana-de-açúcar, apenas uma passagem das máquinas transportadoras consegue lidar com quase cinco linhas de colheita. Já no esquema de colheita mecanizada, é necessário um número significativamente maior de passagens, incluindo a colhedora e os veículos de carga. Isso resulta em movimentação das máquinas em condições desfavoráveis de umidade do solo, afetando negativamente sua estrutura.

De acordo com Cunha, Cascão e Reis, ao fazer tráfego pelo campo de produção em condições impróprias, especialmente nas primeiras passagens, o maquinário causa gradativo comprometimento ao solo. Portanto, é crucial gerenciar o movimento dos veículos agrícolas para evitar danos às linhas de cultivo ou às proximidades.

Segundo Mazza, o novo modelo de produção agrícola de cana-de-açúcar deve incorporar mudanças no ganho adequado no manejo e estruturação do solo durante o plantio. Isso envolve implementar socalcos para proteger o solo e ampliar a infraestrutura logística para minimizar qualquer interferência no desenvolvimento das plantas.

A sistematização racional do solo é capaz de reduzir o impacto do maquinário através da manutenção das linhas de cultivo e a preservação do sistema radicular com ao menos 50% do volume de solo permanecendo intacto. A compactação dá origem a danos físicos permanentes.

## **2.2 Compactação do solo**

A compactação de solo por máquinas agrícolas é um problema comum na agricultura moderna, uma vez que a utilização dessas máquinas pode causar danos significativos ao solo, reduzindo a sua produtividade. A compactação é o processo pelo qual o solo se torna mais denso e menos poroso, o que pode levar à redução da infiltração de água, aumento da erosão e diminuição da disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Atualmente preocupa-se tanto com a compactação do solo, pois esta, é considerada o principal desafio a ser enfrentado em áreas mecanizadas manejadas

sob sistema de plantio direto que visam elevadas produtividades (Stafanoski *et al.*, 2013). De acordo com Lanças (2015) a compactação do solo pode ser definida como o resultado do rearranjo das partículas do solo submetidas a forças externas, ocasionando o aumento na sua densidade pela diminuição do seu volume para uma massa de partículas constante. Assim, Denardin (2018) comenta que a compactação associada a limitações químicas do solo, causam restrição do desenvolvimento radicular das plantas, reduz a disponibilidade de água e nutrientes, levando a redução de produtividade e por consequência, causa prejuízos econômicos aos produtores.

Jokinen, K. (2003) diz que a compactação do solo pode ser causada por diversas atividades agrícolas, como a passagem de máquinas pesadas, a aplicação de fertilizantes e a irrigação. No entanto, a compactação causada pela passagem de máquinas agrícolas é a mais comum e a mais danosa. As máquinas agrícolas que mais contribuem para a compactação do solo são os tratores, colhedoras, semeadoras e pulverizadores (Crocker, 1995).

A compactação do solo pode ser medida através da resistência à penetração do solo, que é a força necessária para penetrar um objeto no solo. Valores elevados de resistência à penetração indicam que o solo está compactado. A compactação do solo pode ser reduzida através de práticas de manejo do solo, como a utilização de técnicas de agricultura conservacionista, a rotação de culturas e o uso de cobertura vegetal (Lipiec, 2000).

Existem diversas estratégias para reduzir a compactação do solo causada por máquinas agrícolas. Uma das estratégias mais eficazes é a utilização de pneus de baixa pressão, que distribuem melhor o peso da máquina sobre o solo. Outra estratégia é a utilização de implementos agrícolas que possuem menor peso e largura de trabalho, reduzindo assim a compressão do solo (Braidá, 2003).

Diversos estudos têm sido realizados para avaliar os efeitos da compactação do solo causada por máquinas agrícolas sobre a produtividade das culturas. Esses estudos têm demonstrado que a compactação do solo pode levar a uma redução significativa na produtividade das culturas, além de aumentar os custos de produção (Silva, 2015).

A compactação do solo causada por máquinas agrícolas é um problema comum na agricultura moderna e pode levar a uma redução significativa na produtividade das culturas. A utilização de técnicas de manejo do solo e a adoção de

estratégias para reduzir a compactação do solo são essenciais para garantir a sustentabilidade da produção agrícola (SILVA, 2015).

Vários estudos têm sido realizados para avaliar o efeito da compactação do solo na agricultura e as técnicas de manejo do solo para reduzir a compactação do solo. Um estudo realizado por Pires *et al.* (2016) avaliou o efeito da compactação do solo na produção de milho e feijão e concluiu que a compactação do solo reduziu a produção de milho em 35% e a produção de feijão em 31%. Outro estudo realizado por Silva *et al.* (2017) avaliou o uso de diferentes técnicas de manejo do solo para reduzir a compactação do solo e concluiu que a adição de materiais orgânicos ao solo, como esterco animal, foi eficaz na redução da compactação do solo e na melhoria da produtividade das culturas.

Algumas pesquisas têm explorado a compactação do solo na cultura da cana-de-açúcar e seus efeitos sobre o rendimento da cultura. Um estudo realizado por Oliveira *et al.* (2018) avaliou o efeito da compactação do solo na produção de cana-de-açúcar em um solo arenoso. O estudo mostrou que a compactação do solo afetou negativamente o rendimento da cultura, com uma redução de até 15,7% na produção de açúcar.

Outro estudo realizado por Gomes *et al.* (2018) avaliou diferentes estratégias de manejo do solo para reduzir a compactação na cultura da cana-de-açúcar. O estudo mostrou que a adoção de práticas de manejo de solo, como o uso de cobertura vegetal e a redução da intensidade de tráfego de máquinas agrícolas, pode reduzir significativamente a compactação do solo e melhorar o rendimento da cultura.

Além disso, há evidências de que a compactação do solo pode afetar a qualidade da cana-de-açúcar. Um estudo realizado por Silva *et al.* (2019) avaliou o efeito da compactação do solo na qualidade da cana-de-açúcar em um solo argiloso. O estudo mostrou que a compactação do solo resultou em uma redução da qualidade da cana-de-açúcar, com uma diminuição do teor de açúcar e aumento da acidez.

### **2.3 Resistência à penetração do solo**

Existem várias formas de detectar a compactação do solo, desde métodos visuais como abrir trincheiras e avaliar a compactação visualmente, até utilizar protocolos laboratoriais precisos e custosos. No entanto, têm sido desenvolvidas técnicas indiretas nas últimas décadas, como o uso de penetrômetros e penetrógrafos,

que medem a resistência à penetração do solo por uma haste metálica.

De acordo com Rosolem (1994), as plantas em geral não respondem à compactação do solo, mas sim à resistência à penetração desse solo. A resistência à penetração depende de fatores como textura do solo, teor de água e densidade. Varón-Ramírez, Camacho-Tamayo e González-Nivia (2018) argumentam que a resistência à penetração pode estar associada ao grau de degradação do solo e pode ser utilizada para identificar áreas de manejo diferenciado.

A resistência à penetração do solo é importante pois está relacionada à restrição que o solo impõe ao crescimento das raízes das culturas, sendo uma ferramenta importante para tomar decisões em relação ao manejo do solo e à produtividade. Pode-se estimar a resistência à penetração do solo com base na sua densidade e teor de água (Souza *et al.*, 2021).

O uso de penetrômetros é uma das maneiras de identificar e caracterizar camadas compactadas do solo no campo. Esses equipamentos medem a resistência mecânica à penetração do solo e essa resistência pode ser relacionada com a resistência que o sistema radicular das plantas encontra ao se desenvolver e com a densidade do solo (Sá; Santos Junior, 2005).

Porém, é importante ressaltar que os penetrômetros são instrumentos de avaliação indireta do estado de compactação do solo e são influenciados pelo teor de água presente no solo. Quanto maior a densidade do solo, maior será a resistência à penetração do cone do penetrômetro (Chancellor, 1981).

Esse método de avaliação de compactação do solo é bastante utilizado na prática, pois permite a obtenção de uma grande quantidade de dados de forma rápida e atende ao critério do custo-benefício em relação aos métodos de laboratório.

Sánchez-Girón, Andreu e Hernanz (1998) indicaram que o teor de água no solo influencia diretamente na compactação do mesmo. Quando o teor de água diminui, ocorre um aumento na intensidade de atrito entre as partículas do solo devido ao efeito lubrificante conferido pela água. Isso afeta a leitura dos dispositivos de penetração, como o penetrômetro mecânico (Rosim *et al.*, 2012).

De acordo com Reinert *et al.* (2008), a compactação do solo tem um impacto negativo no crescimento das raízes das plantas, corroborando os estudos de Olubanjo e Yessoufou (2019). Queiroz-Voltan, Prado e Moretti (1998) constataram deformações no sistema radicular da cana-de-açúcar em solos compactados, com uma relação alta

entre a espessura do córtex e do cilindro vascular. Isso pode resultar em resistência à penetração, menor capacidade de absorção de água e nutrientes, e, conseqüentemente, menor produtividade.

Girardello *et al.* (2014) e Martins *et al.* (2018) afirmam que o tráfego de máquinas agrícolas é o principal fator de compactação na agricultura. A intensidade da compactação depende do equipamento, do tipo de solo e do número de passagens das máquinas.

Marasca *et al.* (2017) e Ferrari *et al.* (2018) obtiveram resultados satisfatórios ao aplicar técnicas de geoestatística para avaliar a distribuição espacial da resistência à penetração do solo. Assis *et al.* (2009), que relacionaram resistência à penetração do solo com teor de água, encontraram uma correlação negativa entre as variáveis, indicando que quanto menor o teor de água do solo, maior a resistência à penetração.

Silva, Reichert e Reinert (2004) observaram uma concentração da resistência à penetração nas áreas de cabeceira das lavouras, onde o tráfego de máquinas é mais intenso durante as operações agrícolas.

Oliveira Filho *et al.* (2016) avaliaram a resistência à penetração do solo em diferentes áreas de produção de cana-de-açúcar e constataram que a amostragem georreferenciada permite um manejo localizado da descompactação, gerando uma economia de recursos de até 18,8%.

Iaia, Maia e Kim (2006) indicaram que o aumento da carga estática das máquinas agrícolas modernas é um dos principais fatores causadores de compactação nos solos agrícolas. A avaliação indireta da compactação do solo é importante para obter informações rápidas e pode ser associada a outros parâmetros experimentais por meio de técnicas geoestatísticas, como a co-Krigagem, para obter melhores resultados.

Conhecer a distribuição das áreas compactadas na lavoura é essencial para o manejo das operações de escarificação e subsolagem, que requerem alta demanda de energia. O manejo localizado da compactação pode reduzir os custos operacionais e energéticos (Machado *et al.*, 2015; Oliveira Filho *et al.*, 2016).

## **2.4 Tecnologia de precisão**

A tecnologia de precisão tem se tornado cada vez mais importante na gestão eficiente de cultivos agrícolas, permitindo o aumento da produtividade e a redução de

custos. Uma das ferramentas de agricultura de precisão que tem ganhado destaque é o controle de tráfego de máquinas agrícolas, que consiste na utilização de sistemas de GPS para delimitar as áreas de trabalho e orientar a operação de máquinas agrícolas.

Segundo Alves (2017) agricultura de precisão é uma abordagem que busca maximizar a eficiência do uso de insumos agrícolas, como sementes, fertilizantes e defensivos, por meio do uso de tecnologias avançadas e análise de dados. Essa abordagem tem ganhado cada vez mais importância, especialmente em um contexto de crescente demanda por alimentos e recursos naturais limitados.

Uma das tecnologias fundamentais da agricultura de precisão é o uso de sensores, como os sensores de umidade do solo, que permitem monitorar as condições ambientais em tempo real e ajustar a aplicação de insumos de acordo com as necessidades da planta. Esses sensores podem ser combinados com técnicas de geoprocessamento, como o uso de imagens de satélite, para mapear e monitorar a variação espacial das condições de cultivo e otimizar o uso de insumos (Bennett, 2010).

Karlen (2010) diz que outra tecnologia importante na agricultura de precisão é o uso de dispositivos de automação, como os sistemas de irrigação inteligentes, que permitem ajustar a quantidade e a frequência da aplicação de água de acordo com as necessidades da planta e das condições climáticas. Além disso, a análise de dados de produção e de qualidade dos alimentos pode ser usada para ajustar a aplicação de insumos e otimizar o rendimento da produção.

Um dos principais benefícios da agricultura de precisão é a redução do impacto ambiental da agricultura, por meio da redução do uso de insumos e do aumento da eficiência do uso de recursos naturais, como a água e o solo. Além disso, essa abordagem pode aumentar a produtividade da agricultura e melhorar a qualidade dos alimentos produzidos (Lowder, 2018).

A agricultura de precisão é uma abordagem em constante evolução, com o surgimento de novas tecnologias e aprimoramento das existentes. Ainda há desafios a serem superados, como o custo elevado de algumas tecnologias e a necessidade de treinamento dos agricultores para o uso adequado dos equipamentos. No entanto, acreditamos que a agricultura de precisão tem um grande potencial para contribuir com a sustentabilidade da agricultura e garantir a segurança alimentar da população

mundial (Sabah, 2018).

Segundo Molin (2015), a agricultura de precisão é uma abordagem inovadora que está se tornando cada vez mais popular entre os agricultores em todo o mundo. O autor destaca que essa abordagem pode ajudar a melhorar a produtividade e a rentabilidade da produção agrícola, além de reduzir os impactos negativos no meio ambiente.

Molin (2015) também destaca que a agricultura de precisão é uma abordagem altamente tecnológica, que requer investimentos significativos em equipamentos e tecnologias avançadas. No entanto, ele argumenta que esses investimentos podem ser compensados pelos benefícios a longo prazo, como a redução de custos e o aumento da produção.

Em relação às tecnologias utilizadas na agricultura de precisão, Molin (2015) destaca que existem diversas opções disponíveis no mercado, incluindo sensores de solo, imagens de satélite, drones e sistemas de informação geográfica. Cada uma dessas tecnologias tem suas próprias vantagens e desvantagens, e cabe aos agricultores escolher qual é a melhor opção para as suas necessidades.

Por fim, Molin (2015) enfatiza a importância de uma abordagem integrada na agricultura de precisão, que envolva a coleta e análise de dados de múltiplas fontes, bem como a utilização de tecnologias avançadas para a tomada de decisões. Ele argumenta que essa abordagem pode ajudar os agricultores a maximizar a eficiência e a rentabilidade da produção agrícola, enquanto minimizam os impactos negativos no meio ambiente.

## **2.5 Uso dos pneus na agricultura**

Os pneus são componentes fundamentais em máquinas agrícolas, proporcionando a estabilidade necessária para a realização de atividades como aragem, semeadura, colheita e transporte de cargas. No entanto, o uso inadequado de pneus pode acarretar em prejuízos econômicos e ambientais, além de comprometer a segurança do operador e dos demais envolvidos nas operações.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para avaliar o desempenho de pneus em máquinas agrícolas, considerando aspectos como a resistência ao desgaste, a capacidade de tração, a estabilidade lateral e a eficiência energética. Segundo Silva *et al.* (2020), a escolha do pneu adequado para cada aplicação deve considerar

fatores como a carga transportada, a velocidade de operação, o tipo de solo e as condições climáticas.

O uso de pneus radiais tem se mostrado vantajoso em relação aos pneus diagonais, devido à sua maior estabilidade lateral e menor resistência ao rolamento. Segundo Souza *et al.* (2019), os pneus radiais apresentam uma área de contato com o solo mais uniforme, o que resulta em menor compactação e maior capacidade de tração.

Além disso, a utilização de pneus sem câmara tem se tornado cada vez mais comum em máquinas agrícolas, devido à sua maior durabilidade e menor risco de falhas decorrentes de furos e vazamentos. De acordo com Basso *et al.* (2020), os pneus sem câmara também proporcionam maior estabilidade em terrenos irregulares, reduzindo o risco de acidentes.

No entanto, é importante ressaltar que o descarte inadequado de pneus pode causar impactos ambientais significativos, uma vez que esses materiais levam décadas para se decompor e podem acumular água, favorecendo a proliferação de mosquitos transmissores de doenças como a dengue e a zika. Nesse sentido, diversas alternativas têm sido propostas para a reutilização de pneus, como a fabricação de pisos ecológicos, de móveis e até mesmo de biodiesel (Santos *et al.*, 2021).

Diversos estudos têm sido realizados para avaliar o impacto do uso de pneus em máquinas agrícolas na compactação do solo. Segundo Munkholm *et al.* (2013), o uso de pneus de baixa pressão em tratores pode reduzir a compactação do solo em até 50%, em comparação com o uso de pneus de alta pressão.

Alves *et al.* (2018) também concluíram que o uso de pneus de baixa pressão em tratores pode reduzir a compactação do solo e melhorar a produtividade das culturas. No entanto, eles destacam que é importante selecionar o tipo de pneu adequado para cada tipo de solo e cultura.

Outro estudo realizado por Hein *et al.* (2010) analisou os efeitos de diferentes tipos de pneus em máquinas agrícolas na compactação do solo. Eles concluíram que pneus mais largos e com maior área de contato com o solo podem reduzir a compactação, além de proporcionar maior estabilidade às máquinas.

Assim, é importante que os produtores rurais avaliem cuidadosamente as vantagens e desvantagens do uso de pneus em suas máquinas agrícolas, levando em consideração não apenas o consumo de combustível, mas também outros aspectos

relevantes para a atividade agrícola.

## **2.6 Uso de telemetria na agricultura**

A telemetria é uma tecnologia que tem sido cada vez mais utilizada na agricultura, permitindo a monitorização remota de diferentes variáveis, como velocidade de deslocamento da máquina, inflação dos pneus, potência desempenhada, entre outras. Este tipo de tecnologia permite aos agricultores obterem informações em tempo real sobre as condições de cultivo, o que pode levar a uma maior eficiência na gestão dos recursos e uma melhoria na produtividade.

Um estudo realizado por Kisekka *et al.* (2017) analisou o uso de telemetria em sistemas de irrigação de culturas de milho em Nebraska, Estados Unidos. Os resultados mostraram que o uso da telemetria permitiu uma redução do consumo de combustível em até 30%, além de uma melhoria na eficiência da irrigação.

Outro estudo realizado por Gomes *et al.* (2019) analisou o uso da telemetria na gestão de pomares de citros no Brasil. Os resultados mostraram que a telemetria permitiu uma maior precisão no fornecimento de água e nutrientes para as plantas, o que levou a uma redução no consumo de água e fertilizantes, além de um aumento na produtividade das culturas.

Além disso, a telemetria também pode ser utilizada na monitorização de pragas e doenças nas plantas. Um estudo realizado por Zhang *et al.* (2018) analisou o uso de sensores remotos para detectar o nível de infestação de pulgões em culturas de trigo na China. Os resultados mostraram que os sensores remotos foram capazes de detectar a infestação de pulgões com uma precisão de até 90%, o que permitiu aos agricultores tomar medidas preventivas antes que a infestação se tornasse grave.

Em resumo, a telemetria tem sido uma ferramenta importante na agricultura, permitindo uma maior eficiência na gestão dos recursos, uma melhoria na produtividade e uma redução nos custos de produção. A sua utilização tem sido amplamente estudada e demonstrou-se ser eficaz em diversas culturas em diferentes partes do mundo.

## **2.7 Uso de GPS em máquinas agrícolas**

O uso de GPS em máquinas agrícolas tem se tornado cada vez mais comum e

importante na agricultura moderna. O GPS (Sistema de Posicionamento Global) permite a localização exata da máquina no campo, o que possibilita o uso de técnicas de agricultura de precisão, como a aplicação de insumos de acordo com a necessidade da planta e o monitoramento da produtividade.

Segundo Cunha *et al.* (2018), a utilização do GPS em máquinas agrícolas pode trazer inúmeros benefícios, como a redução do desperdício de insumos, aumento da produtividade e melhoria da qualidade dos produtos. Além disso, a tecnologia pode auxiliar na diminuição do impacto ambiental da agricultura, pois a aplicação precisa de fertilizantes e defensivos reduz a contaminação do solo e dos recursos hídricos.

O GPS também pode ser utilizado para aprimorar a gestão da propriedade rural. De acordo com Silva *et al.* (2019), a tecnologia pode ser empregada na elaboração de mapas de produtividade e na análise de dados de clima e solo, o que permite a tomada de decisões mais assertivas em relação ao manejo das culturas.

Outra vantagem do uso de GPS em máquinas agrícolas é a possibilidade de automação de tarefas. Segundo Mugueta *et al.* (2018), a tecnologia pode ser utilizada para controlar a direção da máquina, a velocidade e a aplicação de insumos, sem a necessidade de intervenção humana. Isso reduz o tempo e o custo das operações, além de aumentar a eficiência do processo produtivo.

Apesar dos benefícios, a implementação do GPS em máquinas agrícolas pode exigir investimentos significativos por parte dos produtores. Além disso, é necessário que os profissionais responsáveis pela operação das máquinas estejam capacitados para utilizar a tecnologia de forma adequada.

Em resumo, o uso de GPS em máquinas agrícolas é uma tendência na agricultura moderna e pode trazer inúmeros benefícios para o produtor rural. A tecnologia permite a utilização de técnicas de agricultura de precisão, aprimora a gestão da propriedade e possibilita a automação de tarefas. No entanto, é necessário considerar os custos e a capacitação dos profissionais responsáveis pelo uso da tecnologia.

## **2.8 Tráfego controlado de máquinas agrícolas**

A agricultura de precisão insere-se no contexto tecnológico, sendo uma prática que vem contribuindo para o aumento de produtividade e conseqüentemente gera

lucro ao produtor. Por esses motivos está ganhando destaque no cenário nacional e internacional, sendo aplicada principalmente em áreas extensas, cultivadas com plantas de lavoura, tais como soja, milho, algodão, cana-de-açúcar, feijão, trigo e arroz. Segundo Tschiedel (2002), esta tecnologia entende a propriedade como uma área totalmente heterogênea, tratando cada parte conforme sua necessidade, seja esta de água, de insumos agrícolas, ou de tratamentos culturais, possibilitando ao agricultor conhecer de forma detalhada cada metro quadrado de sua área. E para que isso seja possível, as máquinas utilizadas neste sistema devem ser equipadas com sistemas de posicionamento geográfico de alta precisão, associados a *hardwares* e *softwares* que permitem que a operação mecanizada seja feita de forma precisa.

Atrelado a evolução das técnicas da agricultura de precisão, insere-se o tráfego controlado, o qual já vem sendo estudado desde a década de 60 mas só após os anos 90 começou a ganhar espaço no mundo agro de forma mais significativa, através do uso de sistema de piloto automático e da base RTK aplicado a máquinas, os quais tornam possível a implantação do sistema de tráfego controlado em larga escala (Bochtis *et al.*, 2010 citado por Giradello *et al.*, 2017).

De acordo com Gassen (2011) citado por Giradello *et al.* (2012) o sistema de tráfego controlado visa a organização do tráfego de máquinas dentro da lavoura, tendo como pressuposto a movimentação de máquinas e equipamentos em linhas pré-definidas que recebem o nome de "Tramlines", restringindo, desta forma, a compactação a locais específicos.

Atualmente preocupa-se tanto com a compactação do solo, pois esta, é considerada o principal desafio a ser enfrentado em áreas mecanizadas manejadas sob sistema de plantio direto que visam elevadas produtividades (Setafanoski *et al.*, 2013). De acordo com Lanças (2015) a compactação do solo pode ser definida como o resultado do rearranjo das partículas do solo submetidas a forças externas, ocasionando o aumento na sua densidade pela diminuição do seu volume para uma massa de partículas constante. Assim, Denardin (2018) comenta que a compactação associada a limitações químicas do solo, causam restrição do desenvolvimento radicular das plantas, reduz a disponibilidade de água e nutrientes, levando a redução de produtividade e por consequência, causa prejuízos econômicos aos produtores.

De acordo com Giradello *et al.*, (2014) os principais benefícios da implantação do sistema de tráfego controlado são: a menor área de solo que recebe a influência negativa do rodado de máquinas e equipamentos; menor consumo de combustível e

potência requerida das máquinas; menor risco de compactação; redução da perda de solo e de água; menor distancia total percorrida pelas máquinas; maior eficiência logística e no tráfego dentro da lavoura e maior eficiência do uso de água armazenada no solo. Já as desvantagens, o autor citam como o alto custo financeiro necessário para aquisição de sistemas de localização geográfica, o relevo dos talhões e a necessidade do ajuste de bitola das máquinas.

Apesar de o número de benefícios ser maior do que as desvantagens e que em culturas onde o tráfego de maquinas e equipamentos é intenso, como a cana-de-açúcar o sistema mostra-se muito importante, a aplicação desta prática ainda é ínfima no setor do agronegócio brasileiro, revelando um novo desafio, o qual se for superado, pode trazer grandes resultados produtivos.

Roque *et al.*, (2010) diz que o controle de tráfego surge como uma alternativa, minimizando os efeitos da mecanização agrícola, já que separa as zonas de tráfego das em que há desenvolvimento de culturas, concentrando a passagem de pneus em linhas delimitadas. O mesmo autor afirma que a aplicação do tráfego controlado permite melhorias na estrutura física do solo e redução do consumo de combustível, já que a maior parte das áreas cultivadas não será compactada, apresentando redução da resistência de ruptura na passagem de implementos agrícolas, além de gerar uma melhora no potencial de tração, já que o trator passará por solo mais firme, reduzindo os índices de patinagem.

Neste contexto, McPhee *et al.*, (2015) avaliando os efeitos do tráfego controlado sobre as propriedades físicas do solo na Austrália, relatam que a prática do tráfego controlado melhora as propriedades físicas do solo e pode reduzir de 20 a 60% o número de operações nas lavouras, quando comparado a produção convencional, porém, ainda a maior problemática é a falta de máquinas com bitolas maiores. Esteban *et al.*, (2019) avaliando a compactação do solo, sistema radicular e produtividade de cana-de-açúcar sob diferentes espaçamentos entre fileiras e tráfego controlado na colheita, afirmaram que o tráfego controlado proporcionou melhorias nas propriedades físicas do solo, favorecendo o desenvolvimento das plantas, aumentou ainda a macroporosidade, tanto na linha de plantio, como na de tráfego. Além disso, gerou aumentos no rendimento produtivo da cana-de-açúcar.

Ainda no contexto de pesquisas voltadas ao tráfego controlado, Girardello *et al.*, (2017) avaliando a resistência do solo à penetração e o desenvolvimento radicular

da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas, concluiu que o tráfego controlado foi uma estratégia eficiente de confinar a compactação a linha de trânsito das máquinas agrícolas, promovendo o decréscimo da resistência a penetração e favorecendo o crescimento radicular da soja nas camadas subsuperficiais na zona livre de trânsito, porém a produtividade de soja, nas condições do presente experimento de compactação moderada em um ano com precipitação elevada, não foi influenciada pelo tráfego controlado de máquinas agrícolas.

Diversos estudos têm sido realizados para avaliar os efeitos do controle de tráfego na produção agrícola. Em um estudo realizado por Botta *et al.* (2010), verificou-se que a aplicação do controle de tráfego resultou em maiores produtividades de soja e milho, em comparação com áreas de tráfego livre. Outro estudo, realizado por Rost *et al.* (2018), demonstrou que o controle de tráfego resultou em maior teor de matéria orgânica e maior disponibilidade de fósforo no solo.

O controle de tráfego é uma técnica relativamente nova na agricultura, mas que apresenta resultados promissores na redução da compactação do solo e no aumento da produtividade agrícola. Ainda são necessários mais estudos para avaliar os efeitos do controle de tráfego em diferentes tipos de culturas e condições de solo, mas os resultados até o momento indicam que essa técnica pode ser uma ferramenta valiosa para a gestão da lavoura.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida no Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais (NEMPA) localizado na Fazenda Experimental Lageado, que faz parte da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) da UNESP campus de Botucatu – SP.

Os ensaios foram realizados utilizando a Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP) e foram realizados apenas em superfícies deformáveis (ESD).

Foram analisados quinze modelos de pneus utilizados em tratores e máquinas agrícolas, todos de construção radial. As características técnicas dos pneus foram baseadas nas informações fornecidas pelos fabricantes.

#### 3.1 Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP)

A utilização da UFEP no presente estudo foi realizada por vários pesquisadores do NEMPA (Santos e Lanças, 1999; Mazetto *et al.* 2004; Monteiro *et al.*,2010), com a finalidade de simular várias situações de interação entre os pneus dos veículos e as diversas superfícies padronizadas. A UFEP foi desenvolvida e atualizada ao longo do tempo para permitir essa simulação, como mostra a Figura 1.

**Figura 1 - Unidade Fixa de Ensaio de Pneus (UFEP)**



Na UFEP, os rodados de interesse são instalados em um eixo central, onde são aplicadas cargas controladas em uma superfície deformável (conhecida como tanque de solo) e em uma superfície rígida (mesa feita de aço). A carga é aplicada ao rodado/superfície através de um sistema eletro-hidráulico, que é controlado por dispositivos de manobra. Esse sistema é composto por um motor elétrico, uma bomba hidráulica e um pistão que atua sobre o eixo do rodado.

### 3.2 Ensaio de Superfície Deformável (ESD)

Em um Experimento de Sistema Dinâmico Eletro-hidráulico (ESD) na UFEP, o sistema hidráulico foi ativado para reduzir a velocidade do pneu a uma taxa constante, enquanto uma carga controlada, recomendada pela ALAPA (2012), era aplicada a uma amostra de solo contida em um tanque. Essa carga foi mantida constante por 10 segundos e o experimento foi repetido três vezes para cada uma das três superfícies distintas. O tanque utilizado tinha um volume total de 0,8 m<sup>3</sup>, com as seguintes dimensões: largura de 1,03 m, comprimento de 1,30 m e altura de 0,60 m. O solo utilizado foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo, de acordo com a classificação de Santos *et al.* (2018). A análise granulométrica do solo está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1 - Análise física do latossolo vermelho amarelo (Botucatu-2023)**

| <b>ANÁLISE FÍSICA</b> |                     |                    |                   |               |              |
|-----------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------|
| <b>Areia Total</b>    | <b>Areia Grossa</b> | <b>Areia Média</b> | <b>Areia Fina</b> | <b>Argila</b> | <b>Silte</b> |
| (g/dm <sup>3</sup> )  |                     |                    |                   |               |              |
| 645,1                 | 118,6               | 159,5              | 367,0             | 308,0         | 47,2         |

#### **LABORATÓRIO DE FÍSICA DE SOLO**

##### **# RESULTADOS DE ANÁLISE DE SOLO #**

|                     |                             |      |            |               |              |              |                 |
|---------------------|-----------------------------|------|------------|---------------|--------------|--------------|-----------------|
| <b>INTERESSADO:</b> | Prof. Kleber Pereira Lanças |      |            |               |              | <b>Doc:</b>  | 13871           |
| <b>PROCEDÊNCIA:</b> | Patrulha                    |      |            |               |              |              |                 |
| <b>Amostra(s)</b>   | <b>Areia</b>                |      |            | <b>Argila</b> | <b>Silte</b> | <b>Umid.</b> | <b>Textura</b>  |
|                     | Grossa                      | Fina | Total      |               |              |              |                 |
| <b>Lab.</b>         | (g/Kg)                      |      |            |               |              | (%)          | do Solo         |
| <b>EU 45</b>        | 251                         | 228  | <b>478</b> | <b>423</b>    | <b>99</b>    | ---          | <b>Argilosa</b> |

**Fonte:** Elaboração própria.

Para o delineamento experimental serão utilizados 12 modelos de pneus com medidas diferentes para o comparativo. Os ensaios foram realizados em tanque de solo, como mostra a Figura 2, e utilizando a UFEP foi seguindo três pressões e cargas diferentes para cada tipo de pneu.

A montagem dos tanques seguiu um padrão de quantidade de amostra de solo em cinco camadas. Cada camada continha 200kg de solo previamente homogeneizado com teor de água, que foi filtrado através de uma peneira Mesh n°30 com duas malhas.

Para realizar a compactação mecânica de cada camada, foi utilizado uma barra de madeira com 12kg de massa total e 1,25m de comprimento. A barra foi aplicada com impactos a uma altura de 0,3m para garantir uma consistência constante de 10 cm em cada camada de solo.

**Figura 2 - Tanque de solo**



A homogeneização do teor de água foi realizada através do método da compensação volumétrica. Foram analisados os volumes de água presentes no solo durante os ensaios, e adicionada a quantidade necessária de água para manter o teor de água padrão em cada tanque.

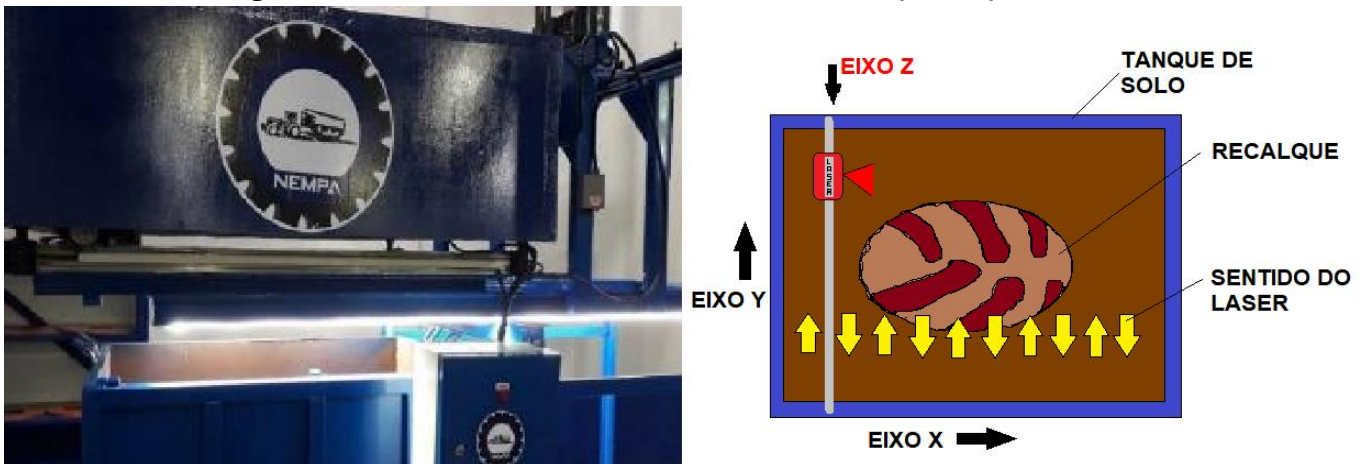
Depois de montar cada tanque, o tanque foi levado para dentro da UFEP. Lá, retirou-se uma amostra padrão de resistência à penetração do solo do tanque, sem

aplicar carga. Além disso, o anel volumétrico foi removido para analisar a densidade do solo.

### 3.3 Perfilômetro digital (*Scanner Laser*) – UFEP

Utilizou-se um sistema de escaneamento automático montado em mesa com controle numérico computadorizado (CNC) e equipado com um sistema laser analógico modelo 96M ODS/V-5070-421 para determinar o recalque nos ESD, como ilustra a Figura 3.

**Figura 3 - Instrumentação do *Scanner Laser* (UFEP)**

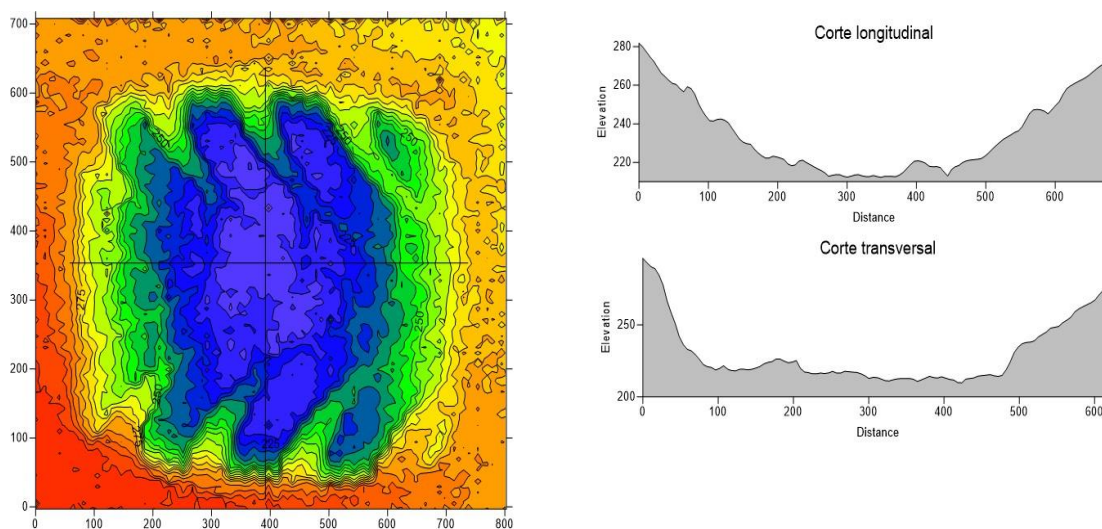


Fonte: Elaboração própria.

O sistema CNC opera como um perfilômetro eletrônico a laser, escaneando em ida e volta ao longo do eixo Y para o deslocamento horizontal e do eixo X para o deslocamento ao longo do tanque. O deslocamento vertical do sinal do sensor laser-superfície representa o eixo Z (ver Figura 3).

Os dados foram registrados em uma matriz de pontos, permitindo a criação de mapas de desvio e avaliação das áreas de contato entre o pneu e a amostra de solo no tanque, como mostra a Figura 4.

**Figura 4 - Mapa gerado após análise e tratamento de dados.**



Fonte: Elaboração própria.

### 3.4 Penetrômetro eletromecânico

O Penetrômetro eletromecânico usado para coletar dados de resistência à penetração do solo consiste em um motor elétrico de 0,19kW de potência. Ele tem sensores programáveis para detectar o início e o fim do curso, bem como uma célula de carga com capacidade máxima de 2kN. A haste padrão possui 50 cm de comprimento e é feita de aço carbono. A ponteira cônica tem um ângulo sólido de 30°, um diâmetro de 20,27 mm e uma área de 323 mm<sup>2</sup>. O sistema segue as características estruturais e operacionais estabelecidas pela norma da ASABE (2012).

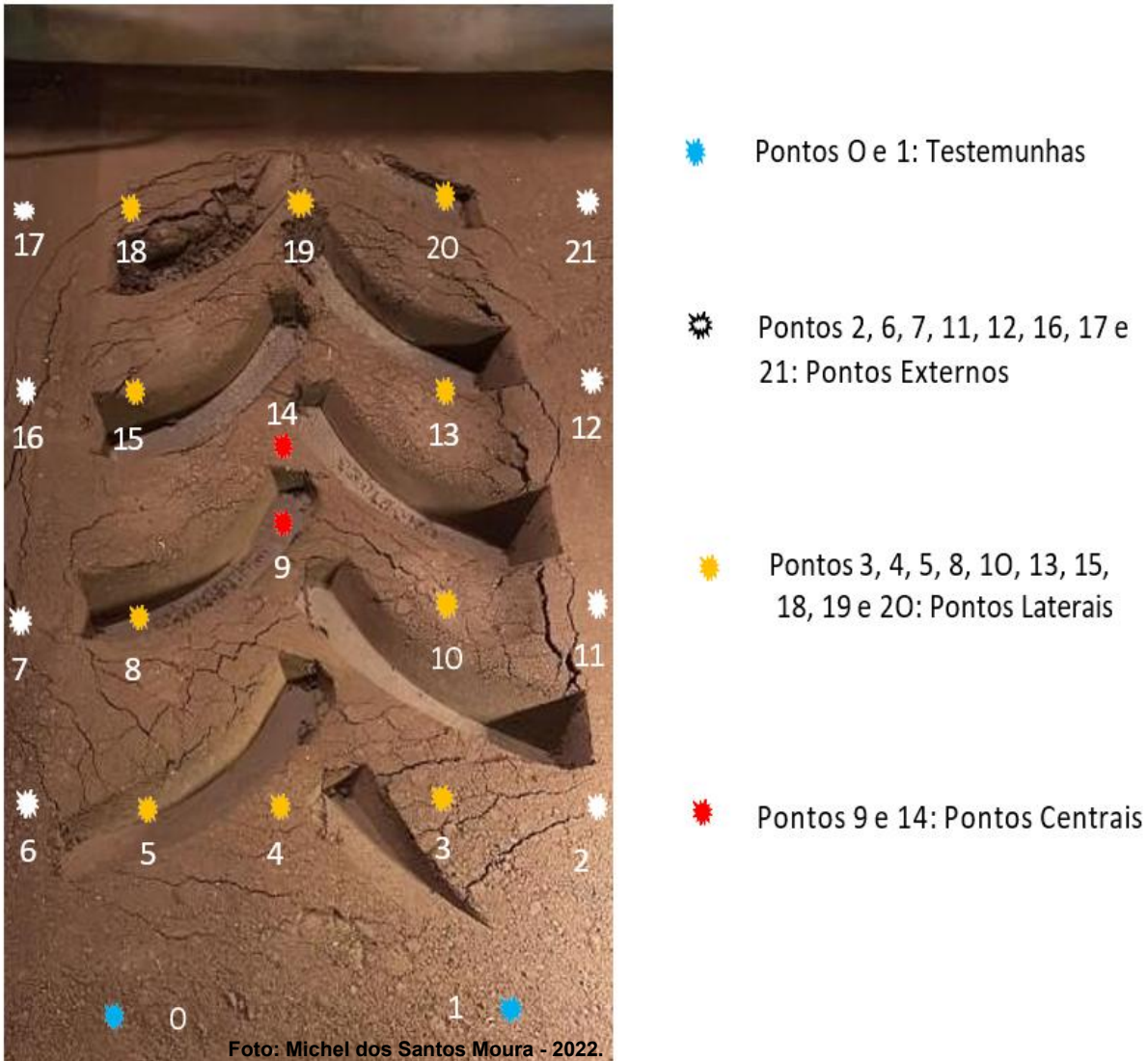
**Figura 5 - Resistência à penetração do solo (Penetrômetro)**



Foto: Michel dos Santos Moura - 2022.

Em cada ponto amostral é determinada a Resistência à Penetração na amostra de solo do tanque em função da profundidade de deslocamento do Cone padrão com ângulo sólido de 30°, com dados obtidos a cada milímetro penetrado, obtendo-se o gráfico de Resistência em função da profundidade, como mostra a Figura 6.

**Figura 6 - Pontos amostrais do “Penetrômetro” na área de contato pneu/solo**



A integração dessa área do gráfico fornece o “Índice de Cone do Solo” (IC) na profundidade desejada.

### 3.5 Teor de umidade e Densidade do solo

O teor de água do solo em cada tratamento foi determinado pelo método padrão ou gravimétrico, que consiste na pesagem anterior e posterior à secagem em estufa

à 105°C por 24 horas. Com os valores anotados, utilizou-se a Equação 1.

**Equação 1:** Teor de Umidade (U).

$$U = [(M_{su} - M_{ss}) / M_{ss}] \times 100 \quad [1]$$

Onde:

U: Teor de água (%);

$M_{su}$ : Massa de solo com água (g);

$M_{ss}$ : Massa de solo seca a 105° (g).

A densidade do solo foi determinada usando o método convencional do anel volumétrico em cada tanque de solo de amostra. As dimensões do tanque de solo na UFEP eram 1,03 m de largura, 1,30 m de comprimento e 0,60 m de altura. A densidade foi calculada usando a Equação 2.

**Equação 2:** Densidade do solo (D).

$$D = (M_s / V_s) \quad [2]$$

Onde:

D: Densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>);

$M_s$ : Massa de solo seco (g);

$V_s$ : Volume do solo (cm<sup>3</sup>).

### 3.6 Análise Estatística

Foram utilizadas estatísticas descritivas para calcular as médias e desvios padrão para todos os pontos em cada tratamento, em relação aos índices de compactação observados. Com base nessas medidas de tendência central e dispersão, foram estimados os intervalos de confiança para a variação das médias observadas em cada tratamento, considerando um nível de significância de 95% e supondo uma distribuição normal da população. Em seguida, comparou-se as médias para identificar diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

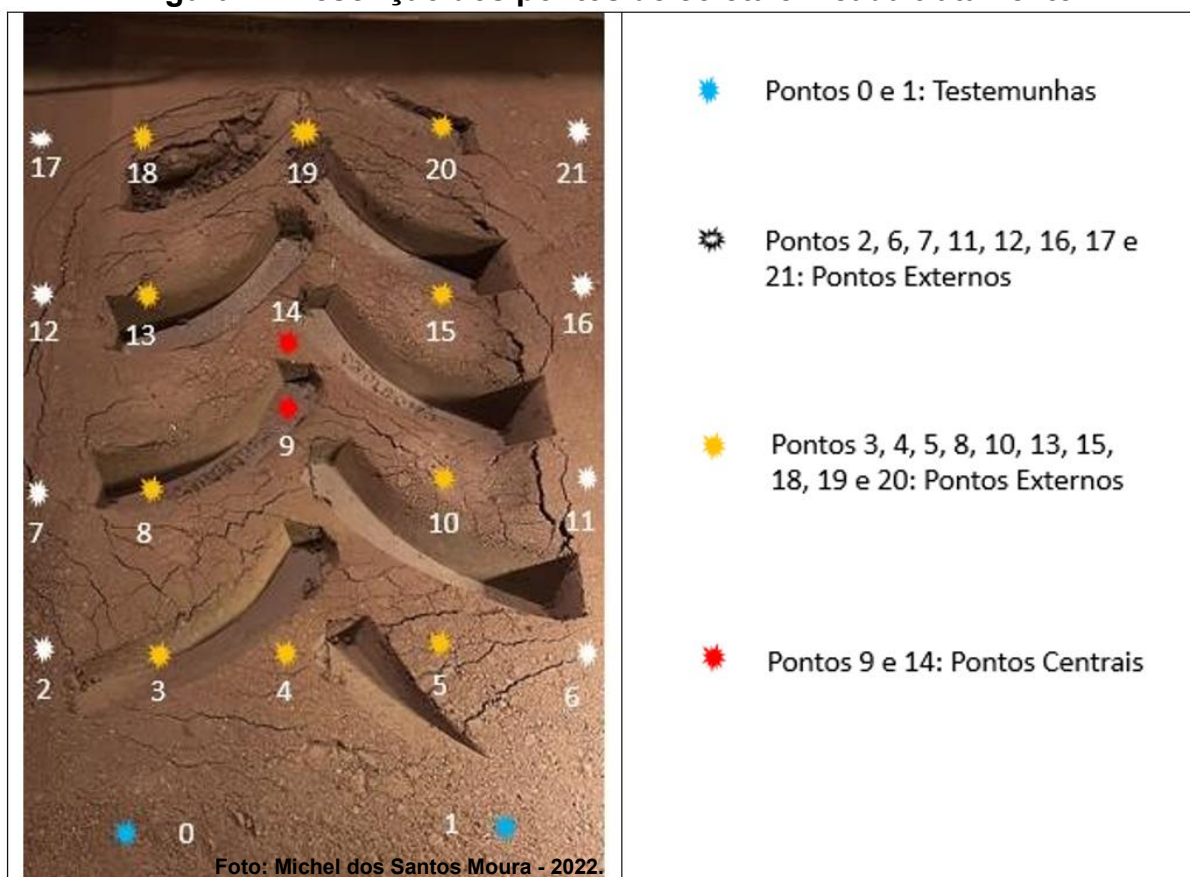
Posteriormente, foram calculadas as médias e desvios padrão para cada ponto de coleta de dados, considerando todos os pontos sem distinção de tratamento. Isso permitiu analisar a compactação do solo dentro e fora da faixa de rodagem dos pneus, com um nível de significância de 95% e assumindo distribuição normal da população. Além disso, foi realizada uma análise gráfica utilizando as médias para identificar a distribuição tridimensional do índice de compactação em cada ponto de coleta.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Amostras

Foram coletadas 26.100 observações distribuídas em 15 tratamentos, nos quais foram coletados os dados de compactação em 20 pontos distintos. Em relação aos pontos de coleta dos índices de compactação, eles foram distribuídos em 4 faixas longitudinais, cada uma com 2 pontos externos à superfície de contato, 1 ponto central e dois outros pontos internos na superfície de rodagem propriamente dita, conforme esquema apresentado na Figura 7.

**Figura 7 - Descrição dos pontos de coleta em cada tratamento**



Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 2 - Análise comparativa da média dos índices de compactação, para um nível de significância de 95% e pressupondo distribuição normal da população (por tratamento)**

| ÍNDICE DE COMPACTAÇÃO |         |        |          |        |                 |                 |
|-----------------------|---------|--------|----------|--------|-----------------|-----------------|
| Tratamento            | Largura | Raio   | Média    | Desvio | Limite inferior | Limite superior |
| T1-T4                 | 600,00  | 745,60 | 1.077,98 | 634,63 | 1.048,16        | 1.107,80        |
| T5-T8                 | 710,00  | 852,60 | 1.415,72 | 715,17 | 1.382,11        | 1.449,32        |
| T9-T12                | 600,00  | 745,60 | 1.220,15 | 653,08 | 1.189,46        | 1.250,84        |
| T13-T16               | 710,00  | 852,60 | 1.132,09 | 648,56 | 1.101,62        | 1.162,56        |
| T17-T20               | 600,00  | 745,60 | 1.184,20 | 640,55 | 1.154,10        | 1.214,30        |
| T21-T24               | 520,00  | 797,60 | 1.356,88 | 761,59 | 1.321,10        | 1.392,67        |
| T25-T28               | 600,00  | 745,60 | 1.120,89 | 627,12 | 1.091,43        | 1.150,36        |
| T29-T32               | 520,00  | 797,60 | 1.249,08 | 787,19 | 1.212,09        | 1.286,06        |
| T33-T36               | 378,46  | 634,06 | 1.290,29 | 535,72 | 1.265,12        | 1.315,46        |
| T37-T40               | 467,36  | 711,40 | 1.329,63 | 659,52 | 1.298,64        | 1.360,62        |
| T41-T44               | 378,46  | 634,06 | 1.355,18 | 573,74 | 1.328,22        | 1.382,14        |
| T45-T48               | 467,36  | 711,40 | 1.374,99 | 574,30 | 1.348,01        | 1.401,97        |
| T49-T52               | 467,36  | 711,40 | 1.285,67 | 530,64 | 1.260,74        | 1.310,60        |
| T53-T56               | 528,32  | 764,44 | 1.153,13 | 624,36 | 1.123,79        | 1.182,46        |
| T57-T60               | 467,36  | 711,40 | 1.134,55 | 564,60 | 1.108,02        | 1.161,08        |

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 3 - Análise comparativa da média dos índices de compactação, para um nível de significância de 95% e pressupondo distribuição normal da população (por grupos de medidas dos pneus)**

| ÍNDICE DE COMPACTAÇÃO |         |        |          |        |                 |                 |
|-----------------------|---------|--------|----------|--------|-----------------|-----------------|
| Tratamento            | Largura | Raio   | Média    | Desvio | Limite inferior | Limite superior |
| T41-T44               | 378,46  | 634,06 | 1.355,18 | 573,74 | 1.328,22        | 1.382,14        |
| T33-T36               | 378,46  | 634,06 | 1.290,29 | 535,72 | 1.265,12        | 1.315,46        |
| T37-T40               | 467,36  | 711,40 | 1.329,63 | 659,52 | 1.298,64        | 1.360,62        |
| T45-T48               | 467,36  | 711,40 | 1.374,99 | 574,30 | 1.348,01        | 1.401,97        |
| T49-T52               | 467,36  | 711,40 | 1.285,67 | 530,64 | 1.260,74        | 1.310,60        |
| T57-T60               | 467,36  | 711,40 | 1.134,55 | 564,60 | 1.108,02        | 1.161,08        |
| T21-T24               | 520,00  | 797,60 | 1.356,88 | 761,59 | 1.321,10        | 1.392,67        |
| T29-T32               | 520,00  | 797,60 | 1.249,08 | 787,19 | 1.212,09        | 1.286,06        |
| T53-T56               | 528,32  | 764,44 | 1.153,13 | 624,36 | 1.123,79        | 1.182,46        |
| T1-T4                 | 600,00  | 745,60 | 1.077,98 | 634,63 | 1.048,16        | 1.107,80        |
| T9-T12                | 600,00  | 745,60 | 1.220,15 | 653,08 | 1.189,46        | 1.250,84        |
| T17-T20               | 600,00  | 745,60 | 1.184,20 | 640,55 | 1.154,10        | 1.214,30        |
| T25-T28               | 600,00  | 745,60 | 1.120,89 | 627,12 | 1.091,43        | 1.150,36        |
| T5-T8                 | 710,00  | 852,60 | 1.415,72 | 715,17 | 1.382,11        | 1.449,32        |
| T13-T16               | 710,00  | 852,60 | 1.132,09 | 648,56 | 1.101,62        | 1.162,56        |

Fonte: Elaboração própria.

## 4.2 Análise dos Dados

No grupo de pneus com L=378,46 e R= 634,06, o índice de compactação de T41 - T44 é estatisticamente diferente de T33 - T36.

No grupo de pneus com L=467,36 e R= 711,40, somente o índice de compactação de T57 – T60 é estatisticamente diferente dos demais

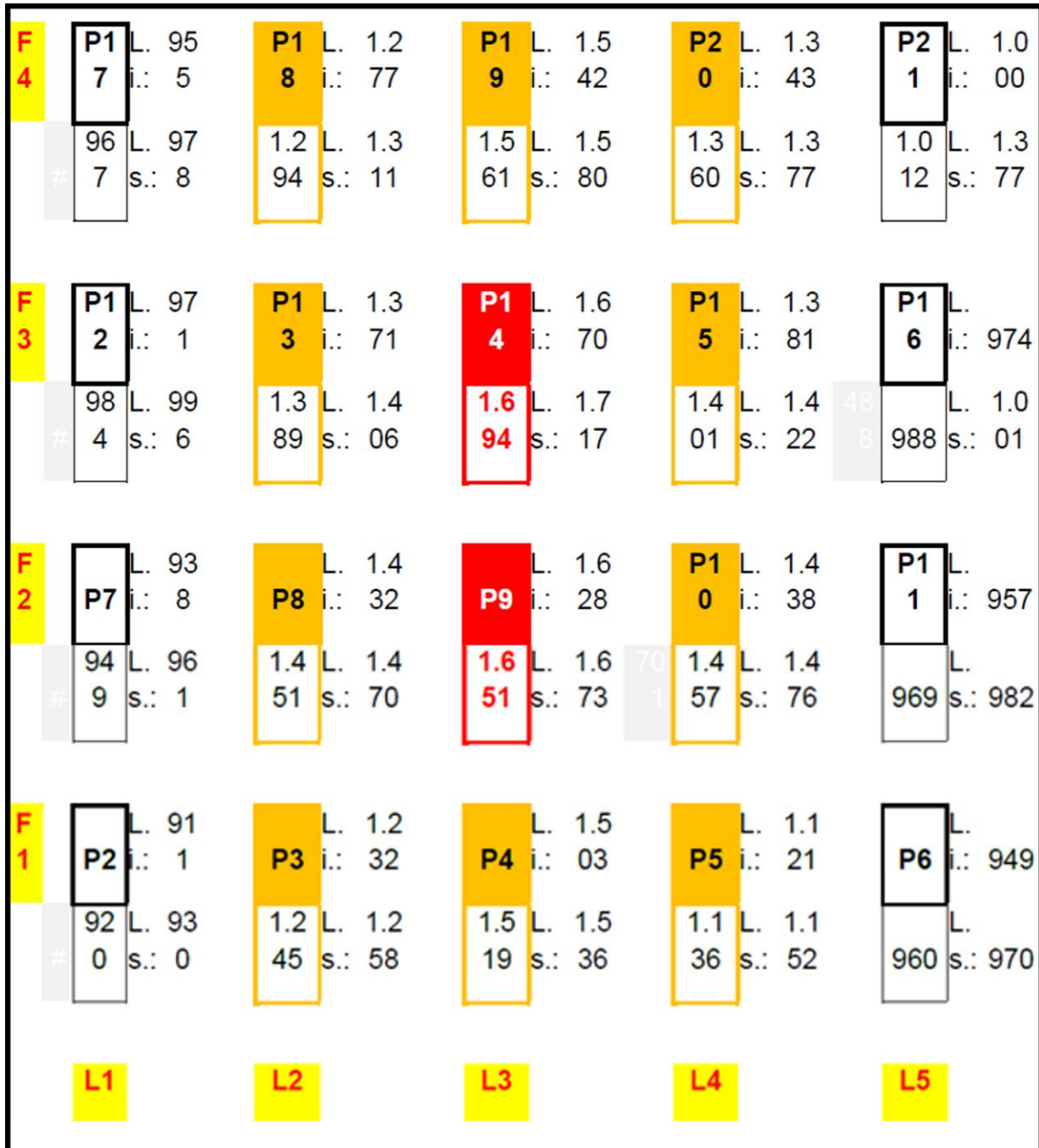
No grupo de pneus com L=520,00 e R= 797,60, o índice de compactação de T21 – T24 é estatisticamente diferente de T29 - T32.

No grupo de pneus com L=600,00 e R= 745,60, somente o índice de compactação de T1 – T4 é estatisticamente diferente dos demais.

No grupo de pneus com L=710,00 e R= 852,60, o índice de compactação de T5 – T8 é estatisticamente diferente de T13 – T16.

A análise de correlação indicou ausência de correlação significativa entre os índices médios de compactação e as larguras dos pneus (-0,3222), assim como em relação aos seus raios (-0,1213).

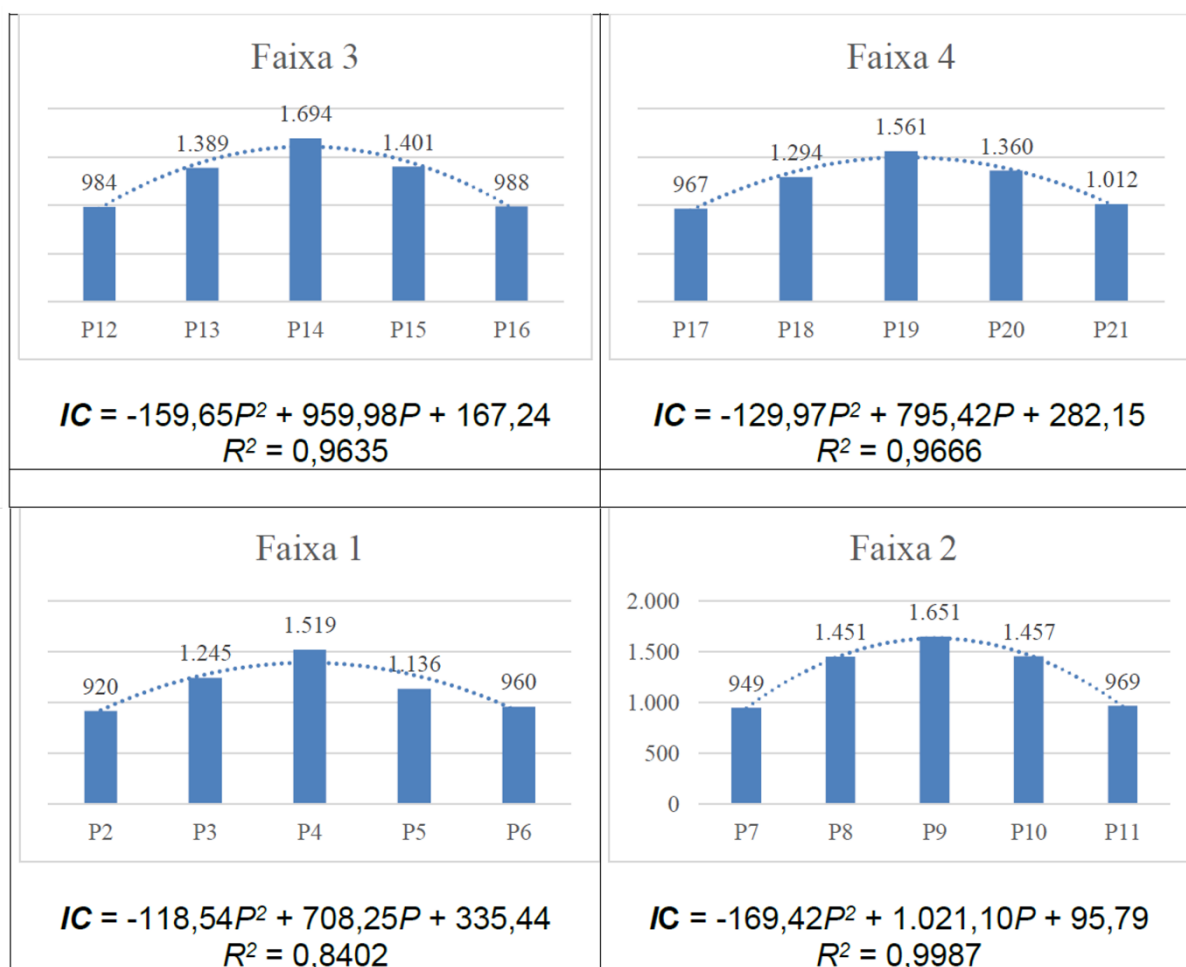
**Figura 8 - Distribuição média do índice de compactação em cada ponto de coleta, para um nível de significância de 95% e pressupondo distribuição normal da população**



Fonte: Elaboração própria.

**Legenda:** F= Fila longitudinal; L= Linha da superfície de rodamem; P= Ponto de coleta do índice de compactação; L.i. = Limite inferior da média do índice de compactação calculado em cada ponto (P)

**Figura 9 - Estimativa do polinômio explicativo da distribuição média do índice de compactação em cada faixa ao longo da superfície de rodagem**



**Fonte:** Elaboração própria.

**Legenda:**  $P$  = Ponto de coleta do índice de compactação; Coeficiente de determinação (percentual das observações);

$R^2$  = médias explicados pelo polinômio  $IC$ ;

$IC$  = Índice de compactação estimado com base no polinômio com maior  $R^2$ .

## 5 CONCLUSÃO

A partir das informações fornecidas, podemos concluir que diferentes grupos de pneus apresentam variação significativa nos índices de compactação para diferentes faixas de tamanho. Em alguns grupos, a diferença é estatisticamente significativa para certas faixas de tamanho, enquanto em outros grupos a diferença é significativa para apenas uma única faixa. Isso indica que as características de compactação variam dependendo do tamanho dos pneus.

Além disso, a análise de correlação indica que não existe uma correlação significativa entre os índices de compactação e as larguras dos pneus, assim como em relação aos seus raios. Isso significa que a largura e o raio dos pneus não estão relacionados de forma significativa com a capacidade de compactação dos mesmos.

Essas conclusões científicas nos permitem entender melhor as relações entre o tamanho dos pneus e suas características de compactação. Isso pode ser útil para o desenvolvimento e aprimoramento de pneus, levando em consideração os diferentes tamanhos e suas necessidades específicas de compactação.

## REFERÊNCIAS

ALAPA. **Associação Latino-Americana de Pneus e Aros. Normas técnicas para pneus agrícolas.** São Paulo, 2012.

ALVES, A. F. et al. Efeito do tráfego de pneus de baixa pressão em solo cultivado com soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 8, p. 551-555, 2018.

ALVES, R. A. et al. Agricultura de Precisão: tecnologia para produção sustentável. **Embrapa**, Brasília, 2017.

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.558-568, 2009.

BASSO, C. et al. Análise de desempenho de pneus radiais e diagonais em tratores agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 345-350, 2020.

BENNETT, D. A. Precision Agriculture and Food Security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.

BOCHTIS, D.D. et al. Effect of controlled traffic in field efficiency. **Biosystems Engineering**, v. 106, p. 14-25, 2010.

BOTTA, G. F. et al. Controle de tráfego na cultura da soja e do milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 11, p. 991-996, 2016.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Qualidade do solo e produtividade de culturas em sistemas conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 949-958, 2003.

CHANCELLOR, W.J. **Compaction of soil by agricultural equipment.** Berkeley: University of California, Division of Agricultural Sciences, p. 53, 1981.

CROCKER, G. J.; BALDOCK, J. O. The effect of subsoil compaction on crop yield in a semi-arid environment. **Soil and Tillage Research**, v 36, n 1, p. 11-24, 1995.

CUNHA, J. P. et al. Agricultura de Precisão: Aplicação do GPS em Máquinas Agrícolas. **Scientia Plena**, v. 14, n. 6, p. 1-8, 2018.

CUNHA, J. P. A. R. DA; CASCÃO, V. N.; REIS, E. F. DOS. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum**, v. 31, n. 3, p. 371-375, 2009.

DENARDIN, J. E. **Compactação e Adensamento de Solo: caracterização, origem, riscos, danos e soluções.** 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/31340322/artigo---compactacao->

e-adensamento-de-solo-caracterizacao-origem-riscos-danos-e-solucoes. Acesso em: 05 abr. 2023.

ESTEBAN, D. A. A. *et al.* Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest.

**Soil And Tillage Research**, v. 187, p.60-71, abr. 2019. Elsevier BV. DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198718305919?via%3Dihub>. Acesso em: 22 fev. 2023.

FERRARI, J. M. S.; GABRIEL, C. P. C.; SILVA, T. B. G.; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; TANAKA, E. M. Análise da Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração do Solo em Diferentes Profundidades. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 164-175, 2018.

GASSEN, D. Tráfego controlado como alternativa para reduzir a compactação do solo. **Revista Plantio Direto**, 2011.

GIRARDELLO, V. C. *et al.* Tráfego controlado de máquinas agrícolas: a experiência inglesa e perspectivas de adoção no Sul do Brasil. **Plantio Direto e Tecnologia Agrícola**, Passo Fundo, v. 137, n. 2, p.42-50, jan. 2012.

GIRARDELLO, V. C *et al.* Benefícios do tráfego controlado de máquinas. **A Granja**, Porto Alegre, v. 785, n. 2, p.34-37, maio 2014.

GIRARDELLO, V. C. *et al.* Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular da soja sob sistema plantio direto com tráfego controlado de máquinas agrícolas. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 86-96, maio 2017.

GOMES, M. A. *et al.* Soil management practices to reduce soil compaction and improve sugarcane yield. **Soil and Tillage Research**, v. 179, p. 173-180, 2018.

GOMES, A. L. R.; BARROS, M. P.; LIMA, J. E. Telemetry applied to citrus crop management in Brazil. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 158, p. 46-54, 2019.

HEIN, L. *et al.* Soil compaction due to agricultural traffic with conventional and low-pressure tyres. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 1, p. 63-71, 2010.

IAIA A. M.; MAIA, J.; KIM, M. E. Use of an electronic penetrometer to evaluate resistance of a soil cultivated with sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n. 2, p.523-530, 2006.

JOKINEN, K., ALAKUKKU, L. **Soil compaction caused by traffic of agricultural machines in Finland. Soil and Tillage Research**, v. 70 n. 2, p. 111-123, 2003.

KARLEN, D. L. *et al.* Precision Agriculture and Sustainability. **Agronomy Journal**, v. 98, n. 1, p. 10-16, 2010.

KISEKKA, I. *et al.* Telemetry for improving crop-water productivity in the Great Plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 11, 2017.

LANÇAS, K. P. Compactação do solo em cana-de-açúcar. In: BELARDO, G. C.; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1. ed. Jaboticabal: **Editora SBEA**, p. 457-476, 2015.

LIPIEC, J. HAKANSSON, I. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 53, n. 2, p. 71-85, 2000.

LOWDER, S. K. *et al.* Precision Agriculture: A global analysis. **Annual Review of Resource Economics**, v. 10, n. 1, p. 485-504, 2018.

MACHADO, T. M.; LANÇAS, K. P.; FIORESE, D. A.; FERNANDES, B. B.; TESTA, J. V. Estimativa de gasto energético da operação de subsolagem em profundidades variáveis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 11, p. 1121-1125, 2015.

MARASCA, I.; GLADENUCCI, J.; SPADIM, E. R.; BARBOSA, R. D.; LANÇAS, K. P. Geoestatística aplicada na determinação da compactação do solo no cultivo da cana-de-açúcar. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 2, p. 49-55, 2017.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; AJAYI, A. E.; TAKAHASHI, E. N.; TASSINARI, D. Soil compaction during harvest operations in five tropical soils with different textures under eucalyptus forests. **Ciência e Agrotecnologia**, v.42, p.58- 68, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-70542018421005217>

MAZZA, J. A. Sistematização e manejo conservacionista dos solos: Manejo dos solos na cana-de-açúcar como subsídio à mecanização. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.4, p.89-104.

MCPHEE, J.E. *et al.* The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. **Soil And Tillage Research**, v. 149, p.33-45, jun. 2015. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.12.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198714002992?via%3Dihub>. Acesso em: 22 fev. 2023.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão: conceitos e aplicações. **Embrapa Informação Tecnológica**, 2015.

MUGUETA, J. L. *et al.* Uso de GPS em maquinaria agrícola. **Revista Agricultura de Precisão**, v. 11, n. 1, p. 32-39, 2018.

MUNKHOLM, L. J. *et al.* Low tyre pressure reduces soil compaction and increases yield in cereals. **Soil Use and Management**, v. 29, n. 4, p. 524-531, 2013.

NASTARI, P. M. Perspectivas para o setor canavieiro: Análise e perspectivas do setor para o Brasil. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA,

2015. Cap.1, p.31-34.

OLIVEIRA, F. C. *et al.* Soil compaction and sugarcane yield in sandy soil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 255-259, 2018.

OLUBANJO, O. O.; YESSOUFOU, M. A. Effect of Soil Compaction on the Growth and Nutrient Uptake of Zea Mays L. **Sustainable Agriculture Research**, v.8, n.2, 2019. DOI: <https://doi.org/sar.v8n2p46>

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; PRADO, H.; MORETTI, F. C. Aspectos estruturais de raízes de cana-de-açúcar sob o efeito da compactação do solo. **Bragantia**, v. 57, n. 1, 1998.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

ROQUE, A. A. O. *et al.* Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 7, p. 744-750, 2010.

ROSIM, D. C.; DE MARIA, I. C.; SILVA, R. L.; SILVA, Á. P. D. Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, v. 71, n. 4, p. 502-508, 2012.

ROSOLEM, C. A. Interpretação de análise de solo e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. In: **Seminário sobre Tecnologias de Manejo de Solo e Adubação da Cana-de-Açúcar**, Ribeirão Preto. Anais, p.53-73, 1994.

ROST, S. *et al.* Efeito do controle de tráfego nas propriedades do solo e na produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2018.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JR. J. D. G. Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 26p., 2005.

SABAH, M. M. *et al.* Precision Agriculture: An Overview of Its Concept and Applications. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 21, n. 2, p. 201-214, 2018.

SÁNCHEZ-GIRÓN, V.; ANDREU, E.; HERNANZ, J.L. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression test. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.48, p.37-50, 1998.

SANTOS, L. A. *et al.* Reaproveitamento de pneus inservíveis na produção de biodiesel. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 10, n. 2, p. 11-18, 2021.

SILVA, P. P.; MARIN, F. R. Straw management effects on sugarcane growth, nutrient cycling and water use in the Brazilian semiarid region. **Bragantia**, v.79, n.1, p.525-533, 2020.

SILVA, A. R.; OLIVEIRA, F. H. T.; SILVA, A. F. Efeito da compactação do solo na produtividade de culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 202-206, 2015.

SILVA, A. M. *et al.* Seleção de pneus agrícolas para tratores de pequeno porte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 10, p. 705-710, 2020.

SILVA, C. A. *et al.* Efeito de diferentes práticas de manejo do solo na compactação em um Argissolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.

SILVA, D. B. *et al.* Uso de GPS em máquinas agrícolas: uma revisão de literatura. **Revista Brasileira de Agricultura de Precisão**, v. 22, n. 3, p. 423-433, 2019.

SILVA, L. M. *et al.* Effects of soil compaction on sugarcane quality in a clay soil. **Soil and Tillage Research**, 2019.

SOUZA, R.; HARTZELL, S.; FERRAZ, A. P. F.; DE ALMEIDA, A. Q.; DE SOUSA LIMA, J. R.; ANTONINO, A. C. D.; DE SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. **Soil and Tillage Research**, v.205, n.1, p.104768, 2021.

SOUZA, G. F. *et al.* Desempenho de pneus radiais e diagonais em tratores agrícolas em diferentes condições de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 609-614, 2019.

STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v. 17, n. 12, p. 1301-309, 2013.

VIAN, C. E. F.; SILVA, R. P.; BARICELO, L. G.; PISSINATO, B. Evolução da produção e mecanização da cana no estado de São Paulo: Desafios e Perspectivas. In: BELARDO, G.C; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana-de-açúcar**. 1ed., 344p., Jaboticabal: SBEA, 2015. Cap.3, p.73-88.

VARÓN-RAMÍREZ, V. M.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; GONZÁLEZ-NIVIA, J. Management zones determination based on physical properties of the soil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, n. 3, p. 248-260, 2018.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. **Introdução a agricultura de precisão: conceitos e vantagens**. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cr/v32n1/a27v32n1.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2023.

ZHANG, J. *et al.* Remote sensing detection of aphid infestation in wheat fields based on hyperspectral data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, p. 295-303, 2018.