UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



CURITIBA 2025

GABRIEL GANANCINI ZIMMERMANN

PERFILÔMETRO DE HASTES ELETRÔNICO PARA MENSURAÇÃO DA MOBILIZAÇÃO DO SOLO

Tese 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 Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Samir Paulo Jasper Coorientador: Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto

CURITIBA 2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP) UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Zimmermann, Gabriel Ganancini

Perfilômetro de hastes eletrônico para mensuração da mobilização do solo / Gabriel Ganancini Zimmermann. – Curitiba, 2025.

1 recurso online: PDF.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Samir Paulo Jasper Coorientador: Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto

1. Sensoriamento remoto. 2. Estrutura do solo. 3. Mecanização agrícola. 4. Física do solo. I. Jasper, Samir Paulo. II. Francetto, Tiago Rodrigo. III. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

Bibliotecária: Elizabeth de Almeida Licke da Luz CRB-9/1434



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ PRÓ-REITORIA DE 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 ClÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **GABRIEL GANANCINI ZIMMERMANN**, intitulada: **PERFILÔMETRO DE HASTES ELETRÔNICO PARA MENSURAÇÃO DA MOBILIZAÇÃO DO SOLO**, 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 doutor 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, 25 de Abril de 2025.

Assinatura Eletrônica 25/04/2025 10:54:01.0 SAMIR PAULO JASPER Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica 25/04/2025 15:29:43.0 FABRICIO CAMPOS MASIERO Avaliador Externo (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE) Assinatura Eletrônica 25/04/2025 10:56:31.0 MURILO BATTISTUZZI MARTINS Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MATO GROSSO DO SUL)

Assinatura Eletrônica 25/04/2025 10:54:21.0 JORGE WILSON CORTEZ Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS)

Dedico esta tese a Deus, à minha família, ao meu orientador, ao meu coorientador e aos meus amigos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida e por me permitir conquistar meus objetivos ao longo de todos os anos de estudo.

À minha família, pelo constante incentivo e apoio, especialmente aos meus pais, Adolfo e Jane, que sempre fizeram o possível para me apoiar.

À minha namorada, Samantha Frohlich, por todo o apoio, compreensão e amor dedicados a mim, todos os dias.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samir Paulo Jasper, pela confiança em meu trabalho, pelos valiosos ensinamentos ao longo do mestrado e doutorado, e pela amizade que sempre se fez presente em todos os momentos. Sua orientação foi fundamental tanto nas minhas necessidades acadêmicas quanto nas questões pessoais, sempre oferecendo apoio imediato. Sinto-me imensamente grato por tudo e, acima de tudo, desejo que nossa amizade perdure por muitos anos, enriquecendo nossas vidas com o mesmo respeito e admiração.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Tiago Rodrigo Francetto, também pela confiança e por prontamente me ajudar sempre que o procurei.

A banca avaliadora, Prof. Dr. Fabricio Campos Masiero, Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez, Prof. Dr. Murilo Battistuzzi Martins e Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, por imediatamente aceitarem participar e contribuir.

A todos os amigos do Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), em especial ao Eduardo Affonso Jung, por toda a ajuda, parceria e pronta disposição ao longo deste período. Agradeço também aos amigos Miguel Acordi, Daniel Savi, Eduardo Alves Gracietti, William Santiago de Mendonça, Bruno Gomes Kobicz, Caio Charneski, Cleiton Pastorio, Jayne Oliveira, Bianca Semes, Edir Nisczak, João Paulo Santos, Rafael Ferraz, Fabricio Narok, Adailto Garcia e tantos outros que possibilitaram a conclusão desta pesquisa.

A Universidade Federal do Paraná, instituição centenária e renomada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS) pela oportunidade, excelência e compromisso. Em especial, à Denise de Conti, Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli e a todo o colegiado, que sempre atenderam minhas necessidades e contribuíram com sua colaboração.

A Fazenda Experimental Canguiri, pela disponibilização da área experimental e implementos agrícolas, e aos colaboradores Rivelino, Jeferson e Márcio, pelo suporte.

Ao Centro de treinamentos CNH (Case – New Holland) pela disponibilidade do trator agrícola e de todo o suporte para o desenvolvimento do experimento.

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

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Muito Obrigado.

RESUMO

A perfilometria do solo, avalia a área mobilizada, o empolamento, a espessura da camada e a rugosidade, sendo uma técnica eficaz para monitorar a qualidade do preparo mecanizado em lavouras. Embora a perfilometria eletrônica tenha avançado, desafios ambientais como a incidência solar e a refletância do solo ainda persiste. Assim, novos estudos com sensores de elevada precisão são alternativas para superar desafios atuais relacionados à precisão das medições em campo. O emprego das hastes é uma alternativa para mitigar as dificuldades de aferição na interface sensor solo, o que associa técnicas avançadas às já validadas e difundidas. Portanto, objetivou-se desenvolver um perfilômetro de hastes com funcionamento eletrônico e determinar o princípio de medição mais adeguado para avaliar a rugosidade do solo. Para isso, foram comparados diferentes sensores, baseados em emissão e recepção de luz, pulsos de laser e reflexão de ondas sonoras. A validação do perfilômetro foi conduzida em distintas condições de rugosidade e avaliadas em três operações de preparo do solo, com os resultados comparados ao método padrão, em laboratório e campo. O experimento em laboratório foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado, no gual foram avaliados os perfilômetros convencional e eletrônico (laser, lidar e ultrassônico), considerando cinco parâmetros de perfilometria (rugosidade modificada, área elevada, área mobilizada, empolamento e espessura), com sete repetições para cada tratamento. No campo, o experimento em faixas, conduzido no delineamento de blocos casualizado, avaliou os dois perfilômetros e diferentes tipos de grades (grade aradora, grade niveladora e duas passadas da grade niveladora), também com sete repetições. No uso da ferramenta, avaliou o perfilômetro eletrônico e a operação de preparo do solo clássico (grade aradora e duas passadas da grade niveladora), com cinco repetições. Os dados coletados foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade da variância. Para os dados que atenderam os pressupostos, foi aplicado o teste F, enquanto para aqueles que não atenderam, utilizou-se o teste H. Após verificar essas condições, foi realizada a análise de variância para identificar os efeitos significativos. Quando os testes F e H indicaram significância, as médias foram comparadas pelo teste de SNK ($p \le 0.05$). Em ambiente laboratorial, o perfilômetro eletrônico demonstrou desempenho e confiabilidade satisfatórios quando comparado ao método convencional. evidenciando a validação da fase do equipamento desenvolvido. O sensor ultrassônico se destacou como o mais confiável para a leitura das hastes, devido à maior amplitude de seu feixe, que favoreceu a detecção. No campo, o perfilômetro apresentou variações de medida associadas principalmente a área elevada e mobilizada. A maior imersão das hastes do perfilômetro convencional pode ter subestimado os valores altimétricos. As variações nos parâmetros de preparo estão diretamente relacionadas às condições do solo e às características do implemento utilizado. Durante o uso da ferramenta em campo, as diferentes operações de preparo do solo não provocaram alterações significativas nos parâmetros de perfilometria avaliados.

Palavras-chave: Sensor ultrassônico. Preparo do solo. Empolamento. Rugosidade.

ABSTRACT

Soil profilometry evaluates the mobilized area, swelling, layer thickness and roughness, and is an effective technique for monitoring the quality of mechanized tillage in crops. Although electronic profilometry has advanced, environmental challenges such as solar incidence and soil reflectance still persist. Thus, new studies with high-precision sensors are alternatives to overcome current challenges related to the accuracy of field measurements. The use of rods is an alternative to mitigate the difficulties of measurement at the soil-sensor interface, which associates advanced techniques with those already validated and disseminated. Therefore, the objective was to develop an electronic rod profilometer and determine the most appropriate measurement principle to assess soil roughness. For this purpose, different sensors based on light emission and reception, laser pulses and sound wave reflection were compared. The profilometer validation was conducted under different roughness conditions and evaluated in three soil preparation operations, with the results compared to the standard method, in the laboratory and in the field. The laboratory experiment was carried out in a completely randomized design, in which conventional and electronic profilometers (laser, lidar and ultrasonic) were evaluated, considering five profilometry parameters (modified roughness, raised area, mobilized area, swelling and thickness), with seven replicates for each treatment. In the field, the strip experiment, conducted in a randomized block design, evaluated the two profilometers and different types of harrows (plowing harrow, leveling harrow and two passes of the leveling harrow), also with seven replicates. In the use of the tool, the electronic profilometer and the classic soil preparation operation (plowing harrow and two passes of the leveling harrow) were evaluated, with five replicates. The collected data were subjected to normality and homogeneity of variance tests. For the data that met the assumptions, the F test was applied, while for those that did not, the H test was used. After verifying these conditions, the analysis of variance was performed to identify the significant effects. When the F and H tests indicated significance, the means were compared by the SNK test ($p \le 0.05$). In a laboratory environment, the electronic profilometer demonstrated satisfactory performance and reliability when compared to the conventional method, evidencing the validation of the developed equipment phase. The ultrasonic sensor stood out as the most reliable for reading the rods, due to the greater amplitude of its beam, which favored detection. In the field, the profilometer presented measurement variations associated mainly with the elevated and mobilized area. The greater immersion of the conventional profilometer rods may have underestimated the altimetric values. The variations in the preparation parameters are directly related to the soil conditions and the characteristics of the implement used. During use of the tool in the field, the different soil preparation operations did not cause significant changes in the evaluated profilometry parameters.

Keywords: Ultrasonic sensor. Soil preparation. Blistering. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PERFILÔMETRO ELETRÔNICO	19
FIGURA 2 – HASTES DE LEITURA	20
FIGURA 3 – CONTROLE ELETRÔNICO	21
FIGURA 4 – CONJUNTO SELETOR DE SENSORES	22
FIGURA 5 – SENSOR DE DISTÂNCIA INFRAVERMELHO (A); LIDAR (B),	
ULTRASSÔNICO (C)	23
FIGURA 6 – CURVA DE CALIBRAÇÃO SENSOR DE DISTÂNCIA	
INFRAVERMELHO (A); LIDAR (B), ULTRASSÔNICO (C)	23
FIGURA 7 – DIAGRAMA ELÉTRICO	24
FIGURA 8 – PERFILÔMETRO CONVENCIONAL	25
FIGURA 9 – CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO	27
FIGURA 10 – ÁREA EXPERIMENTAL I	31
FIGURA 11 – GRADE ARADORA	33
FIGURA 12 – GRADE NIVELADORA	34
FIGURA 13 – TRATOR AGRÍCOLA	34
FIGURA 14 – MENSURAÇÃO DE MASSA ESTÁTICA DO TRATOR	35
FIGURA 15 – DIMENSIONAMENTO DE FAIXAS	36
FIGURA 16 – PERFIL NATURAL DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B)	
ELETRÔNICO	36
FIGURA 17 – PREPARO DO SOLO COM A GRADE ARADORA (A); GRADE	E
NIVELADORA (B) E GRADE NIVELADORA DUAS PASSADA	S (C) 37
FIGURA 18 – PERFIL MOBILIZADO DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B)	
ELETRÔNICO	
FIGURA 19 – PERFIL DE CORTE DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B)	
ELETRÔNICO	
FIGURA 20 – ÁREA EXPERIMENTAL II	41
FIGURA 21 – MENSURAÇÃO DE MASSA ESTÁTICA DO TRATOR	43
FIGURA 22 – LASTRO HIDRÁULICO (A) LASTRO SÓLIDO (B)	44
FIGURA 23 – DIMENSIONAMENTO DA ÁREA EXPERIMENTAL	44
FIGURA 24 – PERFILOMETRIA DO SOLO NATURAL	45
FIGURA 25 – OPERAÇÕES DE PREPARO DO SOLO – GRADE ARADORA	(A) E
GRADE NIVELADORA (B)	46

FIGURA 26 – GRADE ARADORA - PERFIL MOBILIZADO (A), RETIRADA DE	
SOLO (B) E PERFIL DE CORTE	47
FIGURA 27 – GRADE NIVELADORA - PERFIL MOBILIZADO (A), RETIRADA DE	

SOLO (B) E PERFIL DE CORTE......48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL I
TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL II42
TABELA 3 – SÍNTESE DA ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE MÉDIAS PARA
OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM
LABORATÓRIO51
TABELA 4 – SÍNTESE DA ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE MÉDIAS PARA
OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM CAMPO53
TABELA 5 – SÍNTESE DA ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE MÉDIAS PARA
OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO NO USO DA
FERRAMENTA56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO1	6
2 MATERIAL E MÉTODOS1	9
2.1 EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO1	9
2.1.1 Desenvolvimento e construção do perfilômetro eletrônico1	9
2.1.1.1 Estrutura	9
2.1.1.2 Acionamento elétrico2	21
2.1.1.3 Sensores de leitura2	22
2.1.1.4 Sistema de aquisição de dados2	<u>2</u> 4
2.1.2 Desenvolvimento e construção do perfilômetro convencional2	25
2.1.2.1 Estrutura	26
2.1.2.2 Sistema de leitura2	26
2.1.3 Avaliação e calibração do perfilômetro eletrônico2	26
2.1.4 Parâmetros analisados no estudo da perfilometria2	28
2.1.5 Delineamento experimental e análises estatísticas	30
2.2 EXPERIMENTO EM CAMPO	30
2.2.1 Localização da área experimental	30
2.2.2 Caracterização da área experimental3	31
2.2.2.1 Textura do solo	31
2.2.2.2 Resistência do solo à penetração3	31
2.2.2.3 Densidade do solo e umidade volumétrica3	32
2.2.2.4 Análises físicas do solo3	32
2.2.3 Preparo da área experimental	33
2.2.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados	33
2.2.3.2 Avaliação da perfilometria e preparo do solo	35
2.2.4 Delineamento experimental e análises estatísticas4	10
2.3 USO DA FERRAMENTA EM OPERAÇÃO DE CAMPO4	1
2.3.1 Localização da área experimental4	1
2.3.2 Caracterização da área experimental4	1
2.3.2.1 Análises físicas do solo4	2
2.3.3 Preparo da área experimental4	12
2.3.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados4	12
2.3.3.2 Avaliação da perfilometria e preparo do solo4	4

2.3.3 Delineamento experimental e análises estatísticas	50
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
3.1 LABORATÓRIO	51
3.2 CAMPO	53
3.3 USO DA FERRAMENTA	56
4 CONCLUSÃO	58
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6 REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

As características físicas do solo, como estrutura e porosidade, têm forte impacto no desempenho produtivo das culturas. Neste sentido, a manutenção da qualidade destes componentes se caracteriza como um desafio, uma vez que o tráfego intenso de maquinário agrícola é responsável por problemas como a compactação do solo (NAZARI et al., 2023; ALI et al., 2024; ZHANG et al., 2024).

O preparo adequado do solo pode mitigar problemas relacionados às propriedades físicas do solo, como compactação excessiva e baixa capacidade de drenagem, garantindo uma melhor aeração e a distribuição eficiente de nutrientes. Isso favorece o desenvolvimento radicular e crescimento das plantas, ao assegurar que tenham acesso adequado ao oxigênio e aos elementos essenciais para o seu desenvolvimento (CUSSER et al., 2023; TOTH et al., 2024).

O preparo do solo com grades é amplamente utilizado na agricultura moderna devido à sua eficiente capacidade de corte, que promove o deslocamento lateral e horizontal das partículas do solo, além de reduzir o tamanho dos torrões. Para que o desempenho seja ideal, é necessário que o solo apresente baixa resistência ao cisalhamento e os torrões, alta resistência, dentro de uma consistência plástica adequada (KOGUT et al., 2016).

Dentre os implementos comumente utilizados, destacam-se as grades aradora e niveladora. A primeira realiza uma mobilização mais profunda e intensa, promovendo maior revolvimento do solo. Já a grade niveladora atua de forma mais superficial, com menor intensidade de desagregação, o que impacta diretamente na conformação da superfície do solo (RAHEMAN & SARKAR, 2024).

Nesse contexto, a perfilometria surge como uma técnica eficaz para monitorar a qualidade do preparo do solo, pois permite avaliar a rugosidade do solo. A partir dessa variável, é possível calcular a área mobilizada e elevada, o empolamento e a espessura da camada, proporcionando informações detalhadas sobre a operação de preparo do solo e garantindo que esteja sendo realizada de forma eficiente e benéfica para o crescimento das plantas (WANG et al., 2022).

O empolamento refere-se ao aumento de volume ocupado pelo solo após uma ação de mobilização em relação a condição anterior a operação, enquanto a rugosidade superficial indica a variação na elevação do solo, afetando a infiltração e escoamento de água (DUSSÉAUX & VANNIER, 2022). A espessura da camada refere-se à profundidade média em que os órgãos ativos do implemento atuaram. Esses fatores são influenciados pelo tipo de implemento, velocidade, profundidade de operação, condições e características do solo (FRANCETTO et al., 2016; ZHOU et al., 2023).

A avaliação dos parâmetros de qualidade do solo pode ser realizada tanto com dispositivos convencionais, como o perfilômetro de hastes, quanto por meio de tecnologias avançadas equipadas com sensores ópticos, como *laser, lidar* e sensor ultrassônico (BARRETO et al., 2023; MOHAMMADI; MALEKI; KHODAEI, 2023).

Os perfilômetros bidimensionais podem ser classificados em métodos convencionais e eletrônicos. O perfilômetro de hastes convencional tem uma estrutura simples com hastes que permitem a leitura manual da superfície do solo. Já o perfilômetro de hastes eletrônico utiliza barras corrediças, possibilitando o movimento linear de um sistema automatizado para a leitura da seção transversal (ROMANECKAS et al., 2022; NISKANEN et al., 2023).

A automação de processos de coleta de amostras é cada vez mais empregada na agricultura para auxiliar na tomada de decisão, minimizando a ocorrência de falhas nos processos e promovendo tomadas de decisões assertivas (NIJAK et al., 2024). Esta ferramenta traz consigo inúmeros benefícios que podem ser adotados na perfilometria do solo, com destaque para execução de processos em ciclos contínuos que permitem homogeneidade no desempenho.

Zimmermann et al. (2023) desenvolveram um perfilômetro eletrônico de varredura a *laser*, que foi validado em laboratório por meio da comparação com o método convencional. Foram avaliados os parâmetros de rugosidade modificada, área elevada e mobilizada, empolamento e espessura. No campo, verificou-se quatro velocidades de gradagem do solo. Os resultados em laboratório não demonstraram diferença. No campo, houve resultados superiores para o perfilômetro eletrônico em áreas elevadas e mobilizadas e espessura da camada de solo.

Apesar dos avanços do perfilômetro eletrônico, sua operação em campo ainda enfrenta desafios relacionados à incidência solar e à refletância do perfil do solo (FENG et al., 2024; SENNI et al., 2024). Para aprimorar o modelo eletrônico e superar essas dificuldades, é essencial realizar novos estudos com sensores de alta precisão e múltiplos pontos de leitura.

Neste sentido, o perfilômetro de hastes convencional é caracterizado por realizar uma leitura confiável. O contato de cada haste com o solo é convertido em

uma cota altimétrica, que possibilita a visualização das variações entre os pontos de leitura. Entretanto, se trata de uma atividade manual e onerosa. Assim, uma associação entre as técnicas clássica e de automação tem potencial de aprimorar a aferição e mitigar as interferências externas e gargalos da interface sensor solo (ODEY & MANUWA, 2018; AZEVEDO et al., 2023).

Para que sejam obtidos resultados mais acurados é importante que sejam avaliados sensores com diferentes princípios de funcionamento, o que pode favorecer a validação do equipamento. Nesse cenário, sensores ultrassônicos, *lidar* e *laser* se destacam como alternativas promissoras, oferecendo potencial para melhorar a precisão e a confiabilidade das medições em campo (PELENIS et al., 2024).

O sensor ultrassônico emite ondas que geram uma vibração acústica que se propaga em direção aos objetos, deslocando o ar ao redor do transmissor, o que facilita a medição direta da distância de pequenos objetos, mesmo que estejam em posições variáveis (CHANDRASEGAR et al., 2023).

Outro sensor utilizado é o *laser*, que emite um feixe estreito com alta direcionalidade, exigindo alinhamento óptico preciso em relação ao objeto de interesse (BŁASZCZAK-BĄK et al., 2023; GUAN et al., 2024).

O lidar, por sua vez, possui um feixe menos estreito do que o *laser*, mas com maior direcionalidade em comparação com o ultrassônico, o que permite maior precisão na obtenção de dados tridimensionais. Emitindo pulsos de luz que mede o tempo que esses pulsos levam para retornar após refletirem nos objetos, possibilitando a construção de mapas detalhados e modelos *3D* de ambientes. Além disso, o *lidar* é capaz de operar em condições de baixa visibilidade, como em horários noturnos, o que o torna uma ferramenta versátil para a aquisição de dados em ambientes com restrições visuais (JIANG et al., 2024).

Por todo o exposto, objetivou-se desenvolver um perfilômetro de hastes com funcionamento eletrônico e determinar o princípio de medição mais adequado para avaliar a rugosidade do solo. Para isso, foram comparados diferentes sensores, baseados em emissão e recepção de luz, pulsos de *laser* e reflexão de ondas sonoras. A validação do perfilômetro foi conduzida em distintas condições de rugosidade e avaliada em três operações de preparo do solo, com os resultados comparados a um método padrão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 EXPERIMENTO EM LABORATÓRIO

O experimento foi conduzido no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA), no Laboratório de Adequação de Tratores Agrícolas (LATA), situado na Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Brasil.

2.1.1 Desenvolvimento e construção do perfilômetro eletrônico

A (FIGURA 1) apresenta o perfilômetro eletrônico, que possui: estrutura (A), acionamento elétrico (B), sensor de leitura (C) e sistema de aquisição de dados (D).



FIGURA 1 - PERFILÔMETRO ELETRÔNICO

FONTE: O autor (2025).

2.1.1.1 Estrutura

O retângulo estrutural, com dimensões de 3000 x 1500 mm, possui uma articulação central e foi fabricado com perfis de alumínio de 38 x 76 mm. Nas extremidades, foram instalados suportes para o sistema de aquisição de dados, motor de passo e transmissão por polias.

Para o sistema de deslocamento linear transversal foi utilizado um guia ajustável com roldanas acoplado a um perfil do tipo *V-slot*, de dimensões 20 x 40 mm, onde foi fixada uma placa porta ferramenta responsável pelo suporte do sensor de leitura.

O mecanismo responsável por posicionar o sensor eletrônico em relação ao alvo de leitura na parte superior e ao contato com o solo na parte inferior, foi construído usando hastes quadradas de alumínio (diâmetro 20,5 mm e comprimento 1000 mm), espaçadas em 50 mm ao longo de um perfil estrutural. Essas hastes permitiram o ajuste preciso das cotas do perfil (FIGURA 2).



FIGURA 2 - HASTES DE LEITURA

Um alvo refletor de material PLA (Ácido Poliático) na coloração branca, impresso em uma impressora *3D*, foi acoplado na extremidade superior de cada haste para proporcionar uma superfície reflexiva para o sensor eletrônico. A área de contato da superfície é de 1256 mm². Na extremidade inferior de cada haste, um tampão de polietileno (área de contato 420,25 mm²) foi fixado para minimizar o impacto negativo do seu contato com o solo.

FONTE: O autor (2025).

2.1.1.2 Acionamento elétrico

O controle eletrônico através de um *driver* permitiu o ajuste de corrente para o motor de passo, que por sua vez acionou o eixo da transmissão simétrica de polia e correia dentada, proporcionando a tração do conjunto guia de roldanas e da placa porta ferramenta. Em cada extremidade do percurso, foram instalados sensores de parada, que são acionados de acordo com a distância útil percorrida pela placa porta-ferramenta, conforme (FIGURA 3).



FIGURA 3 - CONTROLE ELETRÔNICO

FONTE: O autor (2025).

Utilizou-se o *driver* de alta performance modelo NEO-DM322E fabricado pela Leadshine[®]. Este modelo apresenta oito resoluções de micro passos que podem alcançar 12.800 pulsos por revolução, além de operar em correntes de picos entre 0,3 e 2,2 A na tensão de 12 V. O motor de passo empregado na movimentação linear, responsável por transportar o sensor de leitura ao longo da linha de varredura, foi o modelo NEMA 17 (Leadshine[®]) do tipo híbrido, com acurácia de 0,09° e torque de 8,0 kgf cm.

A transferência de força de tração para o deslocamento do conjunto de leitura, ocorreu por meio de correia dentada, modelo GT2 (SLA[®]), com largura de 10 mm, passo de 2 mm e comprimento de 6000 mm. Conectado ao eixo do motor utilizou-se a polia GT2 (Inbearing[®]), que possui diâmetro externo de 28 mm, largura do berço de 10 mm e 40 dentes internos, respectivamente. O mesmo modelo de polia foi utilizado no eixo passivo oposto.

2.1.1.3 Sensores de leitura

Foram conduzidas medições utilizando três tipos distintos de sensores: um sensor de distância infravermelho (IR), sensor *lidar* (Light Detection and Ranging) e sensor ultrassônico. Cada sensor foi acoplado à placa porta-ferramentas para testes individuais, por meio de um disco seletor (FIGURA 4).



FIGURA 4 - CONJUNTO SELETOR DE SENSORES

FONTE: O autor (2025).

O primeiro sensor de distância infravermelho (Figura 5A), modelo GP2Y0A02YK0F da Sharp[®], com faixa de leitura de 200 a 1500 mm, ângulo de detecção de 33°, tempo de resposta de 38 ms e tensão de alimentação de 4,5 a 5,5 V; o segundo sensor (Figura 5B), modelo *lidar* VL53L1X da ST FlightSense[®], com faixa de leitura de 40 a 4000 mm, campo de visão de 27°, tempo de resposta de 20

ms e tensão de alimentação de 2,6 a 3,5 V; e o terceiro sensor (Figura 5C), modelo ultrassônico HCSR04 com faixa de leitura de 20 a 4000 mm, ângulo de detecção de 15°, tempo de resposta de 200 ms e tensão de alimentação de 5 V.



FONTE: O autor (2025).

Para calibrar cada sensor, foi determinada uma relação entre a leitura e as cotas altimétricas, com base em um referencial previamente estabelecido.

Foram levantadas dez cotas de distância, sendo o valor 95 o ponto de partida, estabelecendo intervalos de 5 cm. Assim, os deslocamentos das hastes para cima resultaram nas cotas (100, 105, 110, 115 e 120 cm), enquanto os deslocamentos para baixo resultaram nas cotas (75, 80, 85, 90 e 95 cm). Os dados obtidos foram analisados por meio de regressão linear e quadrática para determinar a equação que gerou o fator multiplicador na programação. A (FIGURA 6) apresenta as curvas de calibração para cada sensor.

FIGURA 6 – CURVA DE CALIBRAÇÃO SENSOR DE DISTÂNCIA INFRAVERMELHO (A); LIDAR (B), ULTRASSÔNICO (C)







O perfilômetro utilizou um sistema de aquisição de dados baseado no microcontrolador ATmega328 da Atmel[®], com *clock* de 16 MHz, alimentação de 5V e conversor analógico para digital de 10 bits. Uma taxa de aquisição de 1 Hz foi utilizada para capturar o alvo acoplado a haste, medido por um sensor conectado ao SAD. Os dados foram então transferidos para planilhas eletrônicas.

A (FIGURA 7) apresenta o diagrama elétrico, que possui: *lidar* (A), *laser* (B), Ultrassom (C), microcontrolador (D), motor (E), *driver* (F), seletor direita (G1), seletor esquerda (G2), fim de curso direita (H1) e fim de curso esquerda (H2).



24

Para a coleta e visualização dos dados foi criado uma programação em linguagem C++, considerando funções de interação de parâmetros operacionais do *hardware* como pulsos e *delay*, além de controle do sentido e distância de deslocamento do sensor de leitura.

Os pulsos inseridos na programação são reconhecidos pelo *software* do *driver*, o qual transforma e envia os sinais para o chaveamento dos componentes de potência, fornecendo corrente necessária a unidade motora. A relação de pulsos foi obtida por meio de cálculos considerando o sistema motor-transmissão e rendimento da operação. Durante as leituras foram determinados intervalos de tempo para emissão e recepção de sinal pelo sensor, denominado *delay*, parâmetro este responsável por controlar os ciclos de pulsos em alta e baixa (*Time-on e Time-off*).

2.1.2 Desenvolvimento e construção do perfilômetro convencional

O perfilômetro convencional, (FIGURA 8), desenvolvido no referido laboratório, apresenta os componentes: estrutura (B) e sistema de leitura (A e C).



FIGURA 8 - PERFILÔMETRO CONVENCIONAL

FONTE: O autor (2025).

2.1.2.1 Estrutura

A estrutura retangular em perfis de alumínio, possui medidas de 3000 x 1500 mm e articulação central para o transporte. Trilhos condutores foram instalados nas extremidades verticais para permitir o deslocamento do papel de leitura, que é armazenado em uma bobina localizada no lado superior direito da estrutura.

2.1.2.2 Sistema de leitura

O mecanismo de leitura por meio de hastes de alumínio (diâmetro 9,52 mm e comprimento 1000 mm), são espaçadas em 50 mm e distribuídas ao longo de uma linha no suporte do perfilômetro, permitindo o levantamento de cotas do perfil. As hastes possuem tampões de polietileno nas extremidades, com área de 103,8 mm².

Uma bobina de papel, com dimensões de 0,5 x 140 m, foi fixada ao suporte estrutural do perfilômetro, servindo como superfície para a marcação dos pontos referentes às cotas. Após a realização do levantamento do perfil, os valores das cotas foram registrados em planilhas eletrônicas de aquisição de dados.

2.1.3 Avaliação e calibração do perfilômetro eletrônico

As análises de perfilometria do solo foram conduzidas em caixa de solo, com capacidade nominal de 120 L (3000 mm comprimento x 200 mm largura x 200 mm altura), nos quais foram definidos três perfis distintos: mobilizado, não mobilizado e de corte. Os perfis foram construídos manualmente, com o auxílio de espátula e pá, a fim de padronizar as formas de relevo simulando a operação de preparo do solo. O mesmo perfil foi utilizado na avaliação com ambos os perfilômetros, garantindo a uniformidade das condições de medição.

A umidade gravimétrica do solo no momento do ensaio foi de 0,246 kg kg⁻¹, determinada a partir de três amostras coletadas nas profundidades 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 m. O solo utilizado é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico (SUGAMOSTO, 2002), este possui textura franco argiloso arenosa.

Na obtenção do índice de rugosidade e do perfil mobilizado do solo, que permite calcular a Área mobilizada, a Área de elevação e o Empolamento do solo,

utilizou-se os perfilômetros eletrônico e convencional, com largura útil de 2800 mm, com pontos de leitura a cada 50 mm. Ambos perfilômetros foram instalados sobre uma base previamente nivelada, montada na direção transversal a área do perfil, conforme Allmaras et al. (1966).

Assim, foram realizadas as leituras do perfil do solo antes dos preparos simulados, obtendo-se o perfil natural (não mobilizado), e após o preparo do solo, para obtenção do perfil da superfície do solo após mobilizado e o perfil interno do solo mobilizado, denominados, respectivamente, de perfil de elevação e perfil de corte (FIGURA 9), conforme metodologia proposta por Carvalho Filho et al. (2007).

FIGURA 9 - CALIBRAÇÃO DO PERFILÔMETRO



FONTE: O autor (2025).

2.1.4 Parâmetros analisados no estudo da perfilometria

Os cálculos da área de elevação e da área mobilizada foram obtidos por meio da Regra de Simpson (EQUAÇÃO 1), conforme Uddin et al. (2019).

$$\int_{X_0}^{X_n} dx = \frac{h}{3} (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + 2f_4 + ... + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + fn)$$
(1)

em que,

$$h = \frac{X_n - X_o}{n}, X_n > X_o$$

Sendo,

n – número de intervalos;

f – altura das cotas, mm;

h – distância entre cotas, cm, e

X – número de cotas.

O índice de rugosidade superficial (EQUAÇÃO 2) representada pelo desviopadrão entre os logaritmos naturais das leituras das elevações, pela altura média das elevações (ALLMARAS et al., 1966).

$$\sigma y = \sigma x hm$$
 (2)

em que,

σy - estimativa do índice de rugosidade representada pelo desvio-padrão entre as alturas, mm;

σx - desvio-padrão entre os logaritmos naturais das alturas, e

hm - média das alturas, mm.

A área de solo mobilizada consiste na área situada entre o perfil não mobilizado e o perfil de corte, enquanto a área de elevação é aquela situada entre o perfil não mobilizado e o perfil da superfície do solo após a mobilização, conforme descrito por Gamero e Benez (1990).

Obtidos os dados do perfil do solo mobilizado, a espessura média foi calculada por meio da (EQUAÇÃO 3).

$$Ec = \frac{A_{m}}{C_{p}}$$
(3)

em que,

Ec – espessura média da camada mobilizada, m;

Am – área mobilizada do solo, m², e

Cp – comprimento do perfilômetro m.

O empolamento do solo (EQUAÇÃO 4) foi determinado pela razão entre a área de elevação e a área mobilizada pelos órgãos ativos do equipamento, segundo Gamero e Benez (1990).

$$Em = \frac{A_e}{A_m}$$
(4)

em que,

Em – empolamento, %;

Ae – área de elevação, m², e

Am – área mobilizada, m².

A modificação da rugosidade do solo (EQUAÇÃO 5) foi obtida considerandose a diferença entre os índices de rugosidade medidos após e antes do preparo, em relação ao índice de rugosidade antes do preparo do solo, expressa em percentagem, conforme Santos (1993).

$$MR = \frac{IR_{f} - IR_{i}}{IR_{i}} 100$$
(5)

em que,

MR - modificação da rugosidade, %;

IRf - índice de rugosidade após o preparo do solo, e

IRi – índice de rugosidade antes do preparo do solo.

2.1.5 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento foi realizado em um delineamento inteiramente casualizado, no qual os tratamentos avaliados foram os perfilômetros convencional e eletrônico (*laser*, *lidar* e ultrassônico), considerando-se cinco parâmetros de perfilometria (rugosidade modificada, área elevada, área mobilizada, empolamento e espessura), com sete repetições para cada tratamento.

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e ao teste de homogeneidade da variância (Brown e Forsyth). Para os dados que apresentaram normalidade e homogeneidade, foi aplicado o teste F, enquanto para aqueles que não atenderam a esses pressupostos, utilizou-se o teste H (Kruskal-Wallis). Após verificar essas condições, foi realizada a análise de variância para identificar os efeitos significativos, utilizando o *software* estatístico R (R Core Team[®]). Quando os testes F e H indicaram significância (p ≤ 0,05), as médias foram comparadas pelo teste de SNK (p ≤ 0,05).

2.2 EXPERIMENTO EM CAMPO

2.2.1 Localização da área experimental

O experimento foi desenvolvido na Fazenda Experimental Canguiri (FEC/UFPR) localizada em Pinhais-PR, nas coordenadas de 25°38'40" S e 49°12'22" W, com altitude 910 metros acima do nível do mar.

A região é caracterizada por relevo suave ondulado, com clima do tipo Cfb (oceânico temperado), de acordo com a classificação de Köppen. Apresenta estações bem definidas, com temperatura média máxima de 22°C no verão e 8°C no inverno e precipitação média anual de 1.480 mm (IAPAR, 2017).

A área experimental (FIGURA 10) de 0,40 ha, apresenta declividade média de preparo de 1% e presença de cobertura vegetal (Aveia - *Avena sativa* L.). O solo é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico (SUGAMOSTO, 2002).

FIGURA 10 – ÁREA EXPERIMENTAL I



FONTE: O autor (2025).

2.2.2 Caracterização da área experimental

2.2.2.1 Textura do solo

Para determinação da textura do solo, foram coletadas amostras na área experimental, em três trincheiras nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. As amostras foram acondicionadas em recipiente apropriado e levadas ao laboratório, então submetidas a análise pelo método do Densímetro de Bouyoucos, proposto por Gee e Bauder (1986).

2.2.2.2 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração (RSP) foi avaliada por meio do penetrômetro de acionamento manual com registro eletrônico dos dados, modelo PenetroLOG 2040 (Falker[®]), antes do preparo do solo. O equipamento foi configurado para realizar leituras a cada 0,01 m até a profundidade de 0,6 m. O cone utilizado foi do tipo 2, com diâmetro de 12,83 mm e ângulo de 30°, seguindo o estabelecido pela norma S313.3 (ASABE, 2012).

Foram realizadas com este equipamento dez leituras em pontos aleatórios na área, resultando na elaboração de curvas de RSP (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade).

2.2.2.3 Densidade do solo e umidade volumétrica

Foram coletadas amostras indeformadas de solo com o uso de anéis volumétricos de volume conhecido (100 cm³), nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m em três pontos aleatórios ao longo da área experimental, totalizando doze amostras. Após as coletas, os anéis foram identificados, acondicionados em plástico filme, e levados ao laboratório.

No laboratório, foram retirados os filmes plásticos e determinadas às respectivas massas de solo úmido, com o auxílio de balança digital semi-analítica modelo BK 5002 (Gehaka[®]). Em seguida as amostras foram levadas à estufa (105°C) até obtenção da massa constante, para posterior determinação da massa de solo seco, aplicando-se a (EQUAÇÃO 6) e (EQUAÇÃO 7) conforme metodologia de Embrapa (2017).

$$D_{s} = \left(\frac{M_{a}}{V}\right) \tag{6}$$

em que,

Ds – densidade do solo, g cm⁻³;

ma – massa da amostra seca a 105ºC até atingir peso constante, g, e

V – volume do cilindro, cm³.

$$U_{v} = \left(\frac{a - b}{c}\right) \tag{7}$$

em que,

Uv – umidade volumétrica, g g⁻¹;

a – massa da amostra úmida, g;

b – massa da amostra seca a 105°C até atingir peso constante, g, e

c – volume da amostra, cm³.

2.2.2.4 Análises físicas do solo

Na (TABELA 1) constam os valores médios das características físicas, RSP e teor de água do solo na área experimental.

Análises	Valores
Textura do solo* (g kg ⁻¹)	
Areia	513
Silte	175
Argila	313
RSP (MPa)	
0,00 – 0,05 m	0,18
0,05 – 0,10 m	1,00
0,10 – 0,15 m	2,09
0,15 – 0,20 m	3,32
0,20 – 0,25 m	3,96
0,25 – 0,30 m	3,98
Ds (g cm ⁻³)	
0,00 – 0,05 m	1,12
0,05 – 0,10 m	1,14
0,10 – 0,15 m	1,22
0,15 – 0,20 m	1,27
Uv (g g ⁻¹)	
0,00 – 0,05 m	29,35
0,05 – 0,10 m	31,08
0,10 – 0,15 m	34,45
0,15 – 0,20 m	34,84

TABELA 1 - CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL I

Resistência do solo à penetração (RSP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv). *Classe de textura correspondente – Franco argiloso arenoso (BRASIL, 2015). Fonte: O autor (2025).

2.2.3 Preparo da área experimental

2.2.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados

A grade aradora (FIGURA 11) utilizada foi o modelo SGAC14C (Civemasa[®]), equipada com 14 discos recortados de 32 polegadas de diâmetro, espaçados em 360 mm, com uma largura de trabalho de 2340 mm e uma massa total de 3.150 kg.



FIGURA 11 – GRADE ARADORA

FONTE: O autor (2025).

Já a grade niveladora (FIGURA 12) foi o modelo GNCR (TATU Marchesan[®]), com 40 discos (20 discos lisos e 20 discos recortados) de 20 polegadas de diâmetro, espaçados em 195 mm, largura de trabalho de 3700 mm e massa total de 1.651 kg.



FIGURA 12 - GRADE NIVELADORA

FONTE: O autor (2025).

Os implementos foram acoplados na barra de tração do trator New Holland[®], modelo T7 260, com potência nominal (DIN 70020) de 160,92 kW (218,79 cv), transmissão Full Powershift[®] 18 x 6 e dimensionado de acordo com a norma ASABE D496.3 (2011), conforme a (FIGURA 13).

FIGURA 13 - TRATOR AGRÍCOLA



FONTE: O autor (2025).

O trator foi equipado com pneus CEAT[®] *Torquemax*, modelo 600/65R28 na dianteira e 710/70R38 na traseira, ambos com pressão de 79,98 kPa (11,6 psi), resultando em um índice de avanço de 2,03%. A velocidade alvo foi próxima da recomendada para operação de gradagem (MARTINS et al., 2018), com regime de rotação do motor correspondente a 1970 rpm e marcha F7, resultando na velocidade alvo de 1,67 m s⁻¹ (6 km h⁻¹).

As massas estáticas sobre os eixos do trator foram medidas utilizando uma balança Celmig[®] CM-1002, composta por quatro sapatas. A massa total do trator foi de 11.463 kg, distribuída aproximadamente em 43% no eixo dianteiro e 57% no eixo traseiro (ZIMMERMANN et al., 2022) e relação massa e potência de 71,23 kg kW⁻¹, conforme apresentado na FIGURA 14.



FIGURA 14 - MENSURAÇÃO DE MASSA ESTÁTICA DO TRATOR

FONTE: O autor (2025).

2.2.3.2 Avaliação da perfilometria e preparo do solo

A área experimental foi dimensionada (FIGURA 15) em três faixas paralelas (50 x 3 m), correspondendo a grade aradora (uma passagem), grade niveladora (uma passagem) e grade niveladora (duas passagens), com bordadura de um metro de distância. Para cada faixa foram demarcadas sete repetições, através da operação de corte da cobertura vegetal, seguido da fixação de estacas no solo.

FIGURA 15 - DIMENSIONAMENTO DE FAIXAS



FONTE: O autor (2025).

Os perfilômetros (convencional e eletrônico) foram instalados sobre as estacas previamente niveladas, montado na direção transversal ao deslocamento do trator, conforme proposto por Carvalho filho et al. (2007). O perfilômetro eletrônico fez uso do sensor ultrassônico, previamente testado na fase de calibração em laboratório, para sua aplicação em campo.

Após a obtenção das leituras, o perfilômetro foi deslocado na direção longitudinal, fazendo-se coincidir o ponto da última leitura da posição anterior com a primeira leitura no novo posicionamento. Assim, obteve-se o perfil natural do solo através das leituras antes do preparo da área, conforme a (FIGURA 16).



FIGURA 16 - PERFIL NATURAL DO SOLO – (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO



FONTE: O autor (2025).

Para obtenção das faixas mobilizadas realizou-se a operação de preparo do solo (FIGURA 17), com a grade aradora (GA), grade niveladora (GN) e duas passadas na mesma faixa com a grade niveladora (GN2). O trator operou com a tração dianteira auxiliar e bloqueio do diferencial acionados.

FIGURA 17 - PREPARO DO SOLO COM A GRADE ARADORA (A); GRADE NIVELADORA (B) E GRADE NIVELADORA DUAS PASSADAS (C)







FONTE: O autor (2025).

Em seguida ao preparo do solo foi possível realizar as leituras do perfil da superfície mobilizada e do perfil interno do solo mobilizado, denominados, perfil mobilizado (FIGURA 18) e perfil de corte (FIGURA 19). Este último obtido após a retirada do solo mobilizado com auxílio de ferramenta manual.



FIGURA 18 - PERFIL MOBILIZADO DO SOLO - (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO

FONTE: O autor (2025).



FIGURA 19 - PERFIL DE CORTE DO SOLO - (A) CONVENCIONAL (B) ELETRÔNICO



FONTE: O autor (2025).

Conforme a metodologia de coleta realizada no laboratório, os valores de cotas obtidos no perfilômetro convencional foram ditados para planilhas, e as informações do perfilômetro eletrônico armazenadas no próprio computador de aquisição.

2.2.4 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento em faixas, conduzido no delineamento de blocos casualizado, resultaram em dois perfilômetros (Perf), sendo o eletrônico e convencional, e os tipos de grades (TG) (grade aradora, grade niveladora e grade niveladora x2). Para cada tratamento, foram realizadas sete repetições, totalizando 42 unidades experimentais.

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e ao teste de homogeneidade da variância (Brown e Forsyth). Para os dados que apresentaram normalidade e homogeneidade, foi aplicado o teste F. Após verificar essas condições, foi realizada a análise de variância para identificar os efeitos significativos, utilizando o *software* estatístico R (R Core Team[®]). Quando o teste F indicou significância ($p \le 0.05$), as médias foram comparadas pelo teste de SNK ($p \le 0.05$).

2.3 USO DA FERRAMENTA EM OPERAÇÃO DE CAMPO

Após a validação do perfilômetro em campo, a ferramenta foi aplicada em operação de preparo do solo convencional, demonstrando sua capacidade de otimizar o manejo agrícola em condições reais.

2.3.1 Localização da área experimental

A área experimental (FIGURA 20) de 0,40 ha, foi localizada ao lado da área experimental anterior. Apresenta declividade média no sentido de preparo de 1% e presença de restos culturais da colheita de milho (*Zea mays*) para silagem.



FIGURA 20 - ÁREA EXPERIMENTAL II

FONTE: O autor (2025).

2.3.2 Caracterização da área experimental

A resistência do solo à penetração (RSP) foi mensurada com um penetrômetro manual de registro eletrônico, modelo PenetroLOG 2040 (Falker[®]). Foram realizadas dez leituras em pontos aleatórios na área, resultando na elaboração de curvas de RSP (0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade).

Foram coletadas amostras indeformadas de solo com anéis volumétricos (100 cm³) nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15 e 0,15-0,20 m em três pontos aleatórios da área experimental, totalizando doze amostras. Após a coleta, os anéis foram identificados, embalados em plástico PVC e enviados ao laboratório, onde as massas de solo úmido foram determinadas em balança digital. As amostras foram então secas em estufa a 105°C para obtenção da massa constante e determinação da massa de solo seco.

2.3.2.1 Análises físicas do solo

Na (TABELA 2) constam os valores médios das características físicas, RSP e teor de água do solo na área experimental.

Análises	Valores
RSP (MPa)	
0,00 – 0,05 m	0,28
0,05 – 0,10 m	1,66
0,10 – 0,15 m	3,24
0,15 – 0,20 m	3,81
0,20 – 0,25 m	3,86
0,25 – 0,30 m	3,85
Ds (g cm ⁻³)	
0,00 – 0,05 m	1,30
0,05 – 0,10 m	1,29
0,10 – 0,15 m	1,16
0,15 – 0,20 m	1,05
Uv (g g ⁻¹)	
0,00 – 0,05 m	29,83
0,05 – 0,10 m	32,67
0,10 – 0,15 m	48,88
0,15 – 0,20 m	50,55

TABELA 2 – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL II

Resistência do solo à penetração (RSP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv). Fonte: O autor (2025).

2.3.3 Preparo da área experimental

2.3.3.1 Descrição dos equipamentos utilizados

As faixas de solo mobilizado utilizadas na avaliação da perfilometria foram preparadas com as mesmas grades aradora modelo SGAC14C (Civemasa[®]) e niveladora modelo GNCR (TATU Marchesan[®]) empregadas no experimento anterior.

Os implementos foram acoplados na barra de tração do trator Case[®], modelo Puma 185, com potência nominal (DIN 70020) de 125 kW (170 cv), transmissão Semi-Powershift[®] 18 x 6 e dimensionado de acordo com a norma ASABE D496.3 (2011).

O trator foi equipado com pneus Goodyear[®], modelo 18.4-26 na dianteira e 24.5-32 na traseira, com as pressões de 137,90 kPa (20 psi) e 110,32 kPa (16 psi), respectivamente, resultando em um índice de avanço de 3,69%. A velocidade alvo foi próxima da recomendada para operação de gradagem (MARTINS et al., 2018), com regime de rotação do motor correspondente a 2000 rpm e marcha 10, resultando na velocidade alvo de 1,67 m s⁻¹ (6,0 km h⁻¹).

As massas estáticas sobre os eixos do trator (FIGURA 21) foram determinadas com balança Celmig[®] CM-1002, equipada com quatro sapatas. Foi adicionado 75% de lastro hidráulico nos rodados dos eixos dianteiro e traseiro (FIGURA 22A). O lastro metálico foi composto por 16 placas de 35 kg na dianteira e 10 anéis de 65 kg na traseira (FIGURA 22B), totalizando 9.750 kg de massa, distribuída 40% no eixo dianteiro e 60% no eixo traseiro (ZIMMERMANN et al., 2022), resultando em uma relação massa-potência de 78 kg kW⁻¹.



FIGURA 21 – MENSURAÇÃO DE MASSA ESTÁTICA DO TRATOR

FONTE: O autor (2025).



<image>

FONTE: O autor (2025).

2.3.3.2 Avaliação da perfilometria e preparo do solo

A área experimental foi dimensionada (FIGURA 23) com uma faixa de 50 x 4 metros, na qual foram demarcadas cinco repetições, por meio da operação de corte da cobertura vegetal e da fixação de estacas de madeira no solo, alinhadas ao plano horizontal de referência.

FIGURA 23 - DIMENSIONAMENTO DA ÁREA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2025).

FIGURA 22 – LASTRO HIDRÁULICO (A) LASTRO SÓLIDO (B)

O perfilômetro foi instalado sobre as estacas previamente niveladas, montado na direção transversal ao deslocamento do trator, conforme proposto por Carvalho filho et al. (2007). Após a obtenção das leituras, o perfilômetro foi deslocado na direção longitudinal, fazendo-se coincidir o ponto da última leitura da posição anterior com a primeira leitura no novo posicionamento. Assim, obteve-se o perfil natural do solo através das leituras antes do preparo da área (FIGURA 24).



FIGURA 24 - PERFILOMETRIA DO SOLO NATURAL

FONTE: O autor (2025).

Para a obtenção das faixas mobilizadas, foi realizada a operação de preparo do solo nas seguintes etapas. Primeiramente, o solo natural foi preparado com a grade aradora (FIGURA 25A), seguido pelo uso da grade niveladora (FIGURA 25B). Por fim, a grade niveladora foi novamente passada (FIGURA 25B) na mesma faixa, completando o preparo clássico do solo. As leituras de perfilometria foram feitas durante o intervalo das operações. O trator operou com a tração dianteira auxiliar e o bloqueio do diferencial acionados.

FIGURA 25 - OPERAÇÕES DE PREPARO DO SOLO – GRADE ARADORA (A) E GRADE NIVELADORA (B)



FONTE: O autor (2025).

Após o preparo do solo, foram realizadas as leituras do perfil da superfície mobilizada e do perfil interno do solo mobilizado, denominados perfil mobilizado e perfil de corte, sendo este último obtido após a retirada do solo mobilizado com o auxílio de uma ferramenta manual. Leituras com o perfilômetro após a grade aradora (FIGURA 26), a grade niveladora (FIGURA 27) e, por fim, a segunda passada da grade niveladora (FIGURA 28).

В

А





FONTE: O autor (2025).

FIGURA 27 – GRADE NIVELADORA - PERFIL MOBILIZADO (A), RETIRADA DE SOLO (B) E PERFIL DE CORTE



FONTE: O autor (2025).





FONTE: O autor (2025).

De acordo com a metodologia de coleta, as informações do perfilômetro foram armazenadas no computador de aquisição e, posteriormente, processadas em planilhas analíticas.

2.3.3 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento em faixas, conduzido no delineamento de blocos casualizados, avaliou o perfilômetro eletrônico e a operação de preparo do solo clássico (grade aradora, grade niveladora e grade niveladora). Para cada tratamento, foram realizadas cinco repetições, totalizando 15 unidades experimentais.

Os dados coletados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e ao teste de homogeneidade da variância (Brown e Forsyth). Para os dados que apresentaram normalidade e homogeneidade, foi aplicado o teste F. Após verificar essas condições, foi realizada a análise de variância para identificar os efeitos significativos, utilizando o *software* estatístico R (R Core Team[®]). Quando o teste F indicou significância ($p \le 0.05$), as médias foram comparadas pelo teste de SNK ($p \le 0.05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 LABORATÓRIO

Na (TABELA 3) estão os resultados da síntese da análise dos dados de perfilometria do solo. Apenas a rugosidade modificada (RM) apresentou normalidade e homogeneidade nos dados. Ademais, o coeficiente de variação permaneceu estável para todas as variáveis, conforme Ferreira (2018).

TABELA 3 - SÍNTESE DA ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM LABORATÓRIO

	Parâmetros avaliados						
Análises	RM	AE	AM	EM	ES		
	(%)	(cm²)	(cm²)	(%)	(cm)		
Normalidade							
SW	0,169	0,002	0,001	0,012	0,007		
Homogeneidade							
BF	0,186	0,011	0,014	0,037	0,022		
Teste	F	Н	Н	Н	Н		
	30,192**	15,448**	23,175**	16,369**	23,144**		
CV (%)							
	17,04	9,22	3,70	7,29	3,70		
Teste de médias							
Convencional	63,82 A	3.215 A	4.067 A	79,05 B	14,52 C		
Laser	31,41 C	4.003 B	4.603 C	86,86 A	16,44 A		
Lidar	31,84 C	3.008 A	4.284 B	70,22 C	15,30 B		
Ultrassom	50,46 B	3.025 A	4.042 A	74,84 BC	14,44 C		

Rugosidade modificada (RM), Área elevada (AE), Área mobilizada (AM), Empolamento (EM) e Espessura (ES). Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: SW $\leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; SW > 0,05 – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: BF $\leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; BF > 0,05 – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * (p < 0,05) e ** (p < 0,01). Teste H de Kruskal-Wallis: NS – Não significativo; * (p < 0,01). CV (%) – Coeficiente de variação. Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo "teste de SNK" (p < 0,05). FONTE: O autor (2025).

Todos os parâmetros avaliados apresentaram diferenças significativas entre as médias dos tratamentos, com p<0,01. Em relação à rugosidade modificada (RM), o tratamento Convencional apresentou a maior média (63,82%), seguido pelo Ultrassom com 50,46%, indicando um desempenho satisfatório. Em contraste, os tratamentos *Laser* e *Lidar*, que não diferiram entre si, mostraram médias mais baixas, sugerindo menor rugosidade. Na área elevada (AE), o tratamento *Laser* apresentou a maior média, diferindo significativamente do *Lidar* (24,85%) e Ultrassom (24,43%), enquanto os outros tratamentos, incluindo o Convencional, não apresentaram diferença significativa. No que diz respeito à área mobilizada (AM), o *Laser* novamente se destacou (4603 cm²) com a maior média, seguido pelo *Lidar* (4284 cm²). Já os tratamentos Convencional e Ultrassom não diferiram.

Para o empolamento (EM), o tratamento Convencional exibiu o menor valor (79,05%), considerado o mais desejável, enquanto o *Laser* teve o maior empolamento de 86,86%. Os tratamentos Ultrassom e *Lidar* apresentaram resultados intermediários. Por fim, na espessura (ES), o tratamento *Laser* obteve a maior média, seguido pelo *Lidar*, enquanto os tratamentos Convencional e Ultrassom tiveram as menores médias, mais próximas do ideal.

As diferenças entre os tratamentos e a testemunha (perfilômetro convencional) podem ser atribuídas, além dos princípios de funcionamento dos sensores, às dimensões distintas das hastes dos perfilômetros, que determinam a área de contato da extremidade que fica em contato com o solo.

De forma geral, o sensor ultrassônico demonstrou menor diferença em relação ao método convencional, para os parâmetros avaliados. O que indica este sensor como melhor alternativa ao perfilômetro clássico. Este comportamento está relacionado com a forma como a leitura de cada sensor ocorre, em função das características do objeto alvo, extremidade superior da haste.

No caso do sensor ultrassônico, quando a haste não está perfeitamente alinhada com o sensor, a probabilidade de capturar o eco sonoro permanece alta, resultando em um desempenho superior em relação aos outros sensores. Em contraste, o desalinhamento óptico pode causar falhas no funcionamento do *Lidar* (GONG et al., 2024).

Conforme Tonmoy et al. (2023), sensores ultrassônicos apresentam um tempo de reação mais rápido do que o *Lidar*. Apesar disso, o *Lidar* oferece maior precisão e alcance em relação ao sensor ultrassônico. No entanto, seu funcionamento pode ser afetado por condições de iluminação e partículas suspensas no ar.

O sensor a *laser* mostrou-se o menos eficaz na detecção da extremidade superior das hastes. Essa limitação está relacionada à sua alta direcionalidade, que pode dificultar tanto a incidência quanto a reflexão do feixe sobre superfícies estreitas ou inclinadas. Em função disso, seu desempenho foi inferior ao observado com os sensores ultrassônicos e *Lidar*, cuja tecnologia permite maior tolerância angular e melhor resposta em superfícies irregulares.

O processo de movimentação e mistura das partículas do solo, resultante da interação com instrumentos de trabalho é altamente variável. Isso gera irregularidades na posição das hastes do perfilômetro, mesmo sob condições controladas, o que justifica o desempenho superior do sensor ultrassônico devido às suas características (MUDARISOV et al., 2022).

A arquitetura do solo é definida pela configuração espacial das redes de poros, produzidas tanto por processos naturais quanto por práticas de manejo, como operações de preparo. Por serem sistemas porosos tridimensionais e altamente heterogêneos, os solos requerem equipamentos de medição que sejam pouco afetados pela alta variabilidade e por condições temporais adversas, frequentemente observadas em campo (VOGEL et al., 2022).

Na fase de validação em laboratório, o sensor ultrassônico se mostrou o mais confiável para a leitura das hastes, devido à amplitude do seu feixe, que aumenta a probabilidade de detecção. Assim, foi selecionado para a fase experimental no campo.

3.2 CAMPO

A (TABELA 4) apresenta os resultados da síntese da análise dos dados de perfilometria do solo. Todos os parâmetros apresentaram normalidade e homogeneidade dos dados. O coeficiente de variação apresentou média geral de 28,20% estando associado à variabilidade dos atributos físicos na área experimental, conforme explicado por Francetto et al. (2021).

TABELA 4 - SÍNTESE DA ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO EM CAMPO

Análises	Parâmetros avaliados				
	RM (%)	AE (cm²)	AM (cm ²)	EM (%)	ES (cm)
Normalidade					
SW	0,531	0,292	0,437	0,099	0,438
Homogeneidade					
BF	0,953	0,066	0,804	0,522	0,804
Teste F					

Perfilômetro (Perf)	0,16 ^{NS}	2,81 ^{NS}	2,58 ^{NS}	10,71*	2,58 ^{NS}
Tipos de Grade (TG)	3,32 ^{NS}	20,69**	30,91**	1,68 ^{NS}	30,92**
Perf x TG	1,30 ^{NS}	3,19 ^{NS}	0,10 ^{NS}	1,20 ^{NS}	0,10 ^{NS}
Coef. Variação (%)					
Perf	33,53	35,53	21,56	29,69	21,56
TG	56,48	23,57	22,27	39,00	22,27
Perf x TG	42,12	18,82	19,22	18,45	19,24
Teste de médias					
Perfilômetro (Perf)					
Eletrônico	50,77	1564,17	2272,44	63,53 B	8,12
Convencional	53,07	1908,70	2550,77	88,08 A	9,11
Tipos de Grades (TG)					
Grade Aradora	68,28	2315,68 A	3140,18 A	75,66	11,22 A
Grade Niveladora	37,64	1253,99 C	1460,19 C	86,93	05,21 C
Grade Niveladora (x2)	49,85	1639,64 B	2634,45 B	64,83	09,41 B
	Á		· · · · · I · !! · · · I · · /		

Rugosidade modificada (RM), Área elevada (AE), Área mobilizada (AM), Empolamento (EM) e Espessura (ES). Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: SW ≤ 0.05 – Anormalidade dos dados; SW > 0.05 – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: BF \leq 0.05 – Variâncias Heterogêneas; BF > 0.05 – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * (p < 0.05) e ** (p < 0.01). CV (%) – Coeficiente de variação. Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo "teste de SNK" (p < 0.05). FONTE: O autor (2025).

Os resultados obtidos demonstram diferença significativa do fator (Perf) apenas no Empolamento e do fator (TG) nos parâmetros de Área elevada, Área mobilizada e Espessura. Além disso, não foi observada interação significativa entre os fatores (Perf e TG) para os parâmetros analisados.

Em relação ao fator (Perf), o Empolamento foi 23,55% maior no perfilômetro convencional, possivelmente devido à menor área de contato da haste em relação ao eletrônico. Isso provoca uma maior imersão das hastes na superfície do solo mobilizado. Como consequência, o aprofundamento das hastes no solo pode levar à subestimação dos valores altimétricos da superfície, conforme relatado por Laskoski et al. (2017).

Para o fator Tipos de Grades (TG), a Rugosidade modificada e o Empolamento não apresentaram diferença entre os tratamentos. Sendo assim, pode-se afirmar que as variações, para estes parâmetros, estão associadas ao tipo de ação mecânica exercida por cada grade. A grade aradora realiza um revolvimento mais profundo e intenso do solo, enquanto a grade niveladora atua superficialmente, com menor capacidade de desagregação, influenciando diretamente a conformação da superfície.

Variações no comportamento físico dos solos, bem como o efeito do preparo, a exemplo dos parâmetros RM e EM, tem como causas as variações do

micro relevo do solo, decorrentes da desuniformidade inerente às partículas individuais e micro agregados (ZHAO et al., 2024).

Segundo Bögel et al. (2016), a rugosidade e o empolamento do solo são influenciados pelas condições do solo, umidade e densidade, e características do maquinário envolvido, implemento utilizado, profundidade de trabalho e velocidade operacional. Além disso, a rugosidade da superfície do solo apresenta distribuição estocástica, sugerindo que a variabilidade espacial também influencia em alterações deste parâmetro.

O preparo de solo altera o mesmo mecanicamente, para criar condições favoráveis às culturas, por meio de implementos específicos para cada propósito. No caso da operação com grade, o implemento exerce forças tangenciais e normais sobre o solo. As forças tangenciais, geradas pelo movimento de avanço e rotação dos discos, promovem o deslocamento lateral-horizontal das partículas do solo, enquanto as forças normais contribuem para a penetração dos discos e o revolvimento da camada superficial (BADGUJAR et al., 2023).

A Grade aradora apresentou a maior Área elevada, sendo 29,20% superior a Grade niveladora (x2) e 45,85% a Grade niveladora (x1). O mesmo comportamento foi observado para a Área mobilizada e Espessura, onde a Grade aradora foi superior à Grade niveladora (x2), além de que ambas foram superiores à Grade niveladora (x1).

De acordo com Kogut et al. (2016), as forças resultantes da interação entre o solo e os implementos de preparo são reflexo das configurações e particularidades de seus componentes, bem como a regulagem destes, o que explica o que foi observado em função dos diferentes tratamentos.

Cada implemento provoca um micro relevo particular, em condições de textura, umidade e densidade do solo semelhantes (MOHAMMADI; MALEKI; KHODAEI, 2022). O tempo de contato entre os discos e o solo tem relação direta com o grau de perturbação promovida ao solo. Além disso, após a primeira passagem da grade niveladora houve uma desagregação que contribuiu para a segunda passagem gerar os parâmetros obtidos (ZHOU et al., 2023). Justificando a diferença entre as grades, bem como quando a mesma grade foi empregada duas vezes.

Em diferentes operações de preparo do solo, a área de solo elevada é distinta, de forma que muda proporcionalmente à intensidade e duração da interação

resultante na interface solo-implemento (LI et al., 2024). Para este estudo, a maior intensidade de perturbação do solo pela grade aradora foi mais determinante que o prolongamento da interação da grade niveladora (x2), considerando os parâmetros avaliados, em comparação com a grade niveladora (x1).

Mwiti, Gitau e Mbuge (2023) afirmam que a variação das geometrias dos implementos afeta a intensidade da movimentação do solo em operações de preparo. Os autores explicam que as deformações na interface solo-implemento são definidas pelas características de cada equipamento, e influenciam os padrões de falha, o perfil da superfície, o tamanho e a distribuição dos torrões e a orientação dos agregados. O que condiz com variações nos parâmetros de qualidade de preparo obtidas.

Além das condições iniciais do solo, os parâmetros do implemento utilizados no preparo, massa e geometria, tem forte influência no resultado. Embasando a diferenciação dos implementos em função de interações específicas com o solo, possibilitando alcançar múltiplas condições alvo (UCGUL & CHANG, 2023). Desta forma, é interessante que equipamentos de aferição dos parâmetros de qualidade da operação de preparo, a exemplo do perfilômetro, sejam capazes de gerar dados condizentes com as especificidades de cada implemento.

3.3 USO DA FERRAMENTA

A (TABELA 5) apresenta os resultados da síntese da análise dos dados de perfilometria do solo. Todos os parâmetros apresentaram normalidade e homogeneidade dos dados. O coeficiente de variação teve uma média geral de 18,90%, valor que, segundo Francetto et al. (2021), está relacionado à variabilidade dos atributos físicos na área experimental.

	Parâmetros avaliados				
Análises	RM (%)	AE (cm²)	AM (cm²)	EM (%)	ES (cm)
Normalidade					
SW	0,845	0,301	0,717	0,363	0,717
Homogeneidade					
BF	0,653	0,856	0,829	0,989	0,829

TABELA 5 – SÍNTESE DA ANÁLISE ESTATÍSTICA E TESTE DE MÉDIAS PARA OS PARÂMETROS DE PERFILOMETRIA DO SOLO NO USO DA FERRAMENTA

Teste F					
	1,078 ^{NS}	0,716 ^{NS}	1,231 ^{NS}	0,506 ^{NS}	1,231 ^{NS}
CV (%)					
	32,45	16,55	14,50	16,48	14,48
Teste de Médias					
Grade Aradora	69,93	2.190	3.081	71,04	11,00
Grade Niveladora	52,09	2.476	2.667	78,90	9,53
Grade Niveladora (2x)	58,30	2.291	2.869	74,87	10,25
	\ Á I				(()

Rugosidade modificada (RM), Área elevada (AE), Área mobilizada (AM), Empolamento (EM) e Espessura (ES). Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk: SW $\leq 0,05$ – Anormalidade dos dados; SW > 0,05 – Normalidade nos dados. Teste de Homogeneidade das variâncias de Brown e Forsyth: BF $\leq 0,05$ – Variâncias Heterogêneas; BF > 0,05 – Variâncias homogêneas. Teste F da análise de variância (ANOVA): NS – Não significativo; * (p < 0,05) e ** (p < 0,01). CV (%) – Coeficiente de variação. Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem, entre si, pelo "teste de SNK" (p < 0,05). FONTE: O autor (2025).

O teste F não foi significativo para os parâmetros de perfilometria avaliados (RM, AE, AM, EM e ES), o que indica que as diferentes operações de preparo do solo (grade aradora, grade niveladora e duas passadas da grade niveladora) não geraram alterações substanciais e mensuráveis nas características do solo.

Isso pode ser atribuído à alta variabilidade observada nos dados, como indicado pelo coeficiente de variação (CV), que sugere que, apesar das variações nas operações de preparo, os parâmetros do solo não foram suficientemente impactados para gerar resultados estatisticamente significativos, conforme Pimentel et al. (2012), que destacam que um CV elevado sugere uma grande variabilidade relativa dos dados, o que pode indicar uma heterogeneidade significativa entre as unidades amostrais.

4 CONCLUSÃO

Em laboratório, o perfilômetro eletrônico apresentou desempenho e confiabilidade satisfatórios quando comparado ao método convencional, constatando a validação de fase do equipamento desenvolvido. O sensor ultrassônico foi o mais confiável para leitura das hastes, devido à amplitude do seu feixe, que aumenta a probabilidade de detecção. O sensor *lidar* apresentou precisão moderada, sendo mais eficaz que o sensor *laser*, mas inferior ao ultrassônico.

No campo, o perfilômetro apresentou variações de medida associadas principalmente a área elevada e mobilizada. A maior imersão das hastes do perfilômetro convencional pode ter subestimado os valores altimétricos. As variações nos parâmetros de preparo estão diretamente relacionadas às condições do solo e às características do implemento utilizado.

No uso da ferramenta em campo, o preparo do solo com grades não altera os parâmetros de perfilometria eletrônica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em futuras pesquisas, o perfilômetro eletrônico poderá ser utilizado para analisar e ajustar o preparo do solo de acordo com as necessidades específicas de diferentes tipos de culturas, como grãos e cana-de-açúcar. Além disso, poderá ser empregado na avaliação de parâmetros de desempenho operacional e energético de conjuntos mecanizados, como a velocidade operacional e seu impacto na qualidade do preparo do solo, fornecendo também dados sobre o consumo de combustível por volume de solo mobilizado.

Ao integrar o perfilômetro com sistemas de georreferenciamento e *softwares* de gestão agrícola, os pesquisadores podem gerar mapas detalhados das condições do solo. Esses dados são aplicados para criar planos de manejo de precisão, ajustando a aplicação de insumos e operações de manejo do solo.

A utilização contínua da perfilometria do solo também possibilita o acompanhamento da evolução da qualidade do solo ao longo do tempo, permitindo avaliar o impacto das práticas agrícolas, como a rotação de culturas. Dessa forma, esta ferramenta poderá contribuir não apenas para o aumento da produtividade, mas também para a sustentabilidade do sistema agrícola.

6 REFERÊNCIAS

ALI, A. et al. Selection of a stress-based soil compaction test to determine potential impact of machine wheel loads. **European Journal of Soil Science**, v. 75, p. e13501, 2024.

ALLMARAS, R. R. et al. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage. **USDA**, p.22, 1966.

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

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). **ASABE D496.3**: Agricultural machinery management data. St. Joseph, 2011.

AZEVEDO, G. C. D. et al. Validation of automated measurements of soil tillage variables with laser and ultrasound sensors. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v. 27, p. 577-584, 2023.

BADGUJAR, C. et al. Application of computational intelligence methods in agricultural soil–machine interaction: A review. **Agriculture**, v. 13, p. 357, 2023.

BARRETO, B. B. et al. Analysis of the Effect of Tilling and Crop Type on Soil Structure Using 3D Laser Profilometry. **Agriculture**, v. 13, p. e2077, 2023.

BŁASZCZAK-BĄK, W. et al. Measurement methodology for surface defects inventory of building wall using smartphone with light detection and ranging sensor. **Measurement,** v. 219, p. e113286, 2023.

BÖGEL, T. et al. Assessment of soil roughness after tillage using spectral analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 159, p. 73-82, 2016.

BRASIL. IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais (org.).
Manual técnico de Pedologia: manuais técnicos em geociências. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p.

CARVALHO FILHO, A. et al. Soil tillage methods: alterations in the roughness of the soil. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 229-237, 2007.

CHANDRASEGAR, V. et al. Estimation of Azimuth Angle Using an Ultrasonic Sensor for Automobile. **Remote Sensing,** v. 15, p. e1837, 2023.

CUSSER, S. et al. Public and private economic benefits of adopting conservation tillage for cotton pollination. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 342, p. e108251, 2023.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **DIN 70020**: Automotive engineering, maximum speed, acceleration and other terms, definitions, and tests. Berlin, 1986.

DUSSÉAUX, R.; VANNIER, E. Soil surface roughness modelling with the bidirectional autocorrelation function. **Biosystems Engineering**, v. 220, p. 87-102, 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Pesquisa de Solos: Manual de Métodos de Análise de Solo. EMBRAPA solos, Brasília, 2017. 577 p.

FENG, Z. et al. Soil Surface Roughness Characteristics Under Different Agricultural Tillage Practices-A Case Study in the Black Soil Region of Northeast China. **Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing,** v. 17, p. 10781-10792, 2024.

FERREIRA, P. V. Estatística experimental aplicada as ciências agrarias. Viçosa: UFV, 2018.

FRANCETTO, T. R. et al. Disturbance of Ultisol soil based on interactions between furrow openers and coulters for the no-tillage system. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. e0208, 2016.

FRANCETTO, T. R. et al. Effect of the distance between the cutting disc and furrow openers employed in row crop planting on soil mobilization. **Engenharia Agrícola**, v. 41, p. 148-160, 2021.

GAMERO, C. A.; BENEZ, S. H. Avaliação da condição do solo após a operação de preparo. SILVEIRA, GM IV Ciclo de estudos sobre mecanização agrícola. Jundiaí: Fundação Cargill, p. 12-21, 1990.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis, In A. Klute (Ed), Methods of Soil Analysis. **Part I, ASA Monograph**, n. 9, p. 337-382, 1986.

GONG L. et al. PreciseSLAM: Robust, Real-Time, LiDAR–Inertial–Ultrasonic Tightly-Coupled SLAM With Ultraprecise Positioning for Plant Factories. **Transactions on Industrial Informatics**, v. 20, p. 8818-8827, 2024.

GUAN, Y. H. et al. Intelligent Laser Photolysis System. **Sensors & Materials,** v. 36, p. e1032, 2024.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). Cartas climáticas do Paraná. Londrina, 2017.

JIANG, J. et al. Cost-effective Vehicle Recognition System in Challenging Environment Empowered by Micro-Pulse LiDAR and Edge AI. In 2024 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), p. 645-650, 2024.

KOGUT, Z. et al. The effect of the disc setup angles and working depth on disc harrow working resistance. **Biosystems engineering**, v. 151, p. 328-337, 2016.

LASKOSKI, M. et al. Desenvolvimento, construção e validação do perfilômetro a laser. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, p. 132-138, 2017.

LI, Z. et al. Deep vertical rotary tillage depths improved soil conditions and cotton yield for saline farmland in South Xinjiang. **European Journal of Agronomy**, v. 156, p. 127166, 2024.

MARTINS, M. B. et al. Otimização energética de um trator agrícola utilizando normas técnicas em operações de gradagem. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 1, p. 52-57, 2018.

MOHAMMADI, F.; MALEKI, M. R.; KHODAEI, J. Control of variable rate system of a rotary tiller based on real-time measurement of soil surface roughness. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105216, 2022.

MOHAMMADI, F.; MALEKI, M. R.; KHODAEI, J. Laboratory evaluation of infrared and ultrasonic range-finder sensors for on-the-go measurement of soil surface roughness. **Soil and Tillage Research**, v. 229, p. e105678, 2023.

MUDARISOV, S. et al. Evaluation of the significance of the contact model particle parameters in the modelling of wet soils by the discrete element method. **Soil and Tillage Research**, v. 215, p. 105228, 2022.

MWITI, F. M.; GITAU, A. N.; MBUGE, D. O. Effects of soil-tool interaction and mechanical pulverization of arable soils in tillage-a comprehensive review. **Agricultural Engineering International**, v. 25, n. 3, 2023.

NAZARI, M. et al. A meta-analysis of soil susceptibility to machinery-induced compaction in Forest ecosystems across global climatic zones. **Current Forestry Reports**, v. 9, p. 370-381, 2023.

NIJAK, M. et al. On the Importance of Precise Positioning in Robotised Agriculture. **Remote Sensing**, v. 16, p. e985, 2024.

NISKANEN, I. et al. Using a 2D profilometer to determine volume and thickness of stockpiles and ground layers of roads. **Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements**, v. 149, p. e040220, 2023.

ODEY, S. O.; MANUWA, S. I. Development of Profilometer for Measuring Area of Soil Disturbance by Narrow Tillage Tools. **International Journal of Research in Engineering and Science**, v. 6, p. 26-32, 2018.

PELENIS, D. et al. Four-Channel Ultrasonic Sensor for Bulk Liquid and Biochemical Surface Interrogation. **Biosensors**, v. 14, p. 66-74, 2024.

PIMENTEL, J. et al. Variabilidade no solo e suas implicações no preparo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 539-549, 2012.

RAHEMAN, H.; SARKAR, P. **Tillage Machinery-Passive, Active and Combination**. Singapore: Springer, 2024.

ROMANECKAS, K. et al. How to analyze, detect and adjust variable seedbed depth in site-specific sowing systems: a case study. **Agronomy**, v. 12, p. e1092, 2022.

SANTOS, J. dos. Equipamento conjugado de preparo do solo: desempenho em função da posição das hastes escarificadoras, do tipo de ponteira e da rotação do rotor. 1993. 178 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1993.

SENNI, A. P. et al. Automated Windrow Profiling System in Mechanized Peanut Harvesting. **AgriEngineering**, v. 6, p. 3511-3537, 2024.

SUGAMOSTO, M. L. **Uso de técnicas de geoprocessamento para elaboração do mapa de aptidão agrícola e avaliação da adequação de uso do centro de estações experimentais do Canguiri, município de Pinhais - Paraná**. 2002. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR), 2002.

TONMOY, A. B. R. et al. A comparative study on LIDAR and ultrasonic sensor for obstacle avoidance robot car. **International Advances in Electronics**, **Communication, Computing and Intelligent Information Systems**. V. 15, p. 582-587, 2023.

TOTH, M. et al. Long-term effects of tillage systems on soil health of a silt loam in Lower Austria. **Soil and Tillage Research**, v. 241, p. e106120, 2024.

UCGUL, M.; CHANG, C. Design and application of agricultural equipment in tillage systems. **Agriculture**, v. 13, p. 790, 2023.

UDDIN, M. et al. A new study of trapezoidal, Simpson's 1/3 and Simpson's 3/8 rules of numerical integral problems. **Applied Mathematics and Sciences: An International Journal**, v. 6, p. 1-14, 2019.

VOGEL, H. J. et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions. **European Journal of Soil Science**, v. 73, p. e13152, 2022.

WANG, R. et al. Influence of surface roughness and particle characteristics on soil– structure interactions: A state-of-the-art review. **Geosciences**, v. 12, p. e145, 2022.

ZHANG, B. et al. Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. Land Degradation & Development, v. 35, p. 3256-3273, 2024.

ZHAO, Z. et al. Estimation of agricultural soil surface roughness based on ultrasonic echo signal characteristics. **Soil and Tillage Research**, v. 239, p. 106038, 2024.

ZHOU, S. et al. Dynamic Change Patterns of Soil Surface Roughness and Influencing Factors under Different Tillage Conditions in Typical Mollisol Areas of Northeast China. **Agronomy**, v. 13, p. e1817, 2023.

ZIMMERMANN, G. G. et al. Development of an electronic profilometer to measure mobilization variables in soil harrowing. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 21, p. e0204, 2023.

ZIMMERMANN, G. G. et al. Effect of hydraulic and solid ballast on agricultural tractor performance. **Revista Ciência Agronômica**, v. 53, p. e20217963, 2022.