

VINÍCIUS RIGUEIRO MESSA

MATÉRIA ORGÂNICA E RESILIÊNCIA DE LATOSSOLOS
ARGILOSOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2024

VINÍCIUS RIGUEIRO MESSA

MATÉRIA ORGÂNICA E RESILIÊNCIA DE LATOSSOLOS
ARGILOSOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dr. Deonir Secco

Coorientadora: Dra. Araceli Ciotti de Marins

Coorientador: Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior

CASCADEL
PARANÁ - BRASIL
FEVEREIRO - 2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Messa, Vinicius Rigueiro
Matéria orgânica e resiliência de latossolos argilosos sob sistema plantio direto / Vinicius Rigueiro Messa; orientador Deonir Secco; coorientadora Araceli Ciotti de Marins. -- Cascavel, 2024.
96 p.

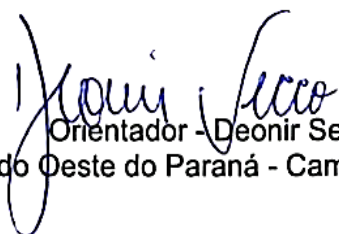
Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2024.

1. Estrutura do Solo. 2. Elasticidade do Solo. 3. Tráfego de máquinas. 4. Compactação. I. Secco, Deonir, orient. II. Marins, Araceli Ciotti de, coorient. III. Título.

VINÍCIUS RIGUEIRO MESSA

Matéria orgânica e resiliência de latossolos argilosos sob sistema plantio direto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Biomassa e culturas energéticas, APROVADO pela seguinte banca examinadora:




Orientador - Deonir Secco

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANTONIO CARLOS TORRES DA COSTA
Data: 27/02/2024 10:14:26-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Antonio Carlos Torres da Costa

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Marechal Cândido Rondon (UNIOESTE)



Douglas Basségio

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
gov.br HELTON APARECIDO ROSA
Data: 27/02/2024 13:45:56-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Hélton Aparecido Rosa

Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz (FAG)

Documento assinado digitalmente
gov.br RUBENS FEY
Data: 26/02/2024 17:38:40-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Rubens Fey

Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus de Laranjeiras do Sul (UFFS)

Cascavel, 26 de fevereiro de 2024

À minha família, aos meus pais Adilson e Marina pelo exemplo de vida, por seus ensinamentos, amor e apoio incondicionais em todos os momentos da minha vida. E às minhas irmãs Juliana e Pollyana pela presença, amizade, companheirismo e apoio durante o percorrer dos caminhos.

Dedico!

“Seja forte e corajoso.”

Josué 1:9

“Tudo posso naquele que me fortalece.”

Filipenses 4:13

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me concedido saúde, sabedoria para enfrentar mais esta etapa de minha vida, e concedido serenidade diante das dificuldades do caminho e superá-las com equilíbrio e alegria.

À minha família, gratidão por estar sempre ao meu lado, pelo carinho, apoio emocional, apoio nos estudos, no trabalho do dia-a-dia, sempre me fortalecendo.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA) pela oportunidade de cursar o doutorado.

À equipe do PPGEA em apoiar nos momentos necessários.

Ao NEEA e IDR-Paraná pela disponibilidade das áreas para a pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela disponibilização da bolsa de doutorado.

Ao meu orientador, professor Dr. Deonir Secco pela oportunidade, ajuda, ensinamentos, paciência e confiança.

Aos meus coorientadores, Dra. Araceli Ciotti de Marins e Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior pelo auxílio nos momentos precisos, trocando experiências e conhecimentos.

A todas as pessoas que direta e indiretamente me apoiaram neste trabalho.

Muito Obrigado!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola - NEEA - Unioeste, <i>campus</i> Cascavel, PR e do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) - polo regional de Santa Tereza do Oeste, PR.....	31
Figura 2. Croqui das áreas experimentais (NEEA/IDR-Paraná). FP: faixa de produção da soja; FM: faixa de monitoramento. 0P, 1P, 3P, 5P: número de passadas conjunto trator-pulverizador para estabelecimento dos tratamentos. Áreas mais escuras na figura, representam as repetições em cada tratamento.....	33
Figura 3. Precipitação de dezembro/2020 a abril/2021 (Safrá 2020/2021) e de outubro/2021 a abril/2022 (Safrá 2021/2022) do NEEA e IDR-Paraná.....	35
Figura 4. Condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) em permeâmetro de carga constante. Fonte: Modificado de Reinert; Reichert (2006).....	36
Figura 5. Valores médios da Ds das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja (valores médios de 5 repetições) nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e do IDR-Paraná (c e d). Safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente. Médias dos tratamentos seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	37
Figura 6. Valores médios da Ma das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja (valores médios de 5 repetições) nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e do IDR-Paraná (c e d). Safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente. Médias dos tratamentos seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	39
Figura 7. Produtividade da soja nas áreas do NEEA e do IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022. 0P: azul; 1P: vermelho; 3P: verde; 5P: roxo. Médias dos estados de compactação seguidas por letras distintas nas colunas diferem estatisticamente através do teste de Tukey ($p < 0,05$).....	45
Figura 8. Informações climáticas do NEEA e IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022.....	52
Figura 9. Perfilômetro para determinação do microrelevo do solo. Fonte: Modificado de Vidal Vázquez et al. (2010) e Klein (2014).....	53
Figura 10. Posicionamento e nivelamento do perfilômetro e alocação de blocos de concreto a 0,50 m de profundidade nos intervalos ao lado da FM como nível de referência Fonte: Modificado de Vidal Vázquez et al. (2010).....	54
Figura 11. Valores médios do IR dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja (valores médios de 5 repetições) nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e do IDR-Paraná (c e d). Safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente. Médias de tratamentos seguidas de “ns” não houve diferença significativa. Médias de tratamentos seguidas de “***” houve diferença significativa e as letras maiúsculas representam a diferença significativa entre a condição antes da compactação e a última leitura pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).....	56

Figura 12. Valores médios do percentual residual da deformação do solo ($P_{\text{residual-DS}}$) e do percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{\text{recuperação-DS}}$), dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador das áreas do NEEA e do IDR-Paraná.....57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química dos solos da área do NEEA e do IDR-Paraná.....	31
Tabela 2. Dados de semeadura, manejo fitossanitário e colheita da soja.....	34
Tabela 3. Valores médios da Mi, Pt e Ksat do NEEA das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos 0, 1, 3 e 5 passadas nas safras 2020/2021 e 2021/2022.....	41
Tabela 4. Valores médios da Mi, Pt e Ksat do IDR-Paraná das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos 0, 1, 3 e 5 passadas nas safras 2020/2021 e 2021/2022.....	43
Tabela 5. Leituras perfilômetro nas áreas do NEEA e IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022.....	55
Tabela 6. Caracterização química dos solos por tratamento da camada de 0-0,2 m das áreas experimentais do NEEA - Unioeste, <i>campus</i> Cascavel, PR e do IDR-Paraná - Santa Tereza do Oeste, PR.....	77
Tabela 7. Teor de MOS (%) nas áreas experimentais (NEEA/IDR-Paraná). (Valores médios de 5 repetições da camada de 0-0,3 m).....	78
Tabela 8. Composição granulométrica do solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m das áreas experimentais do NEEA - Unioeste, <i>campus</i> Cascavel, PR e do IDR-Paraná - Santa Tereza do Oeste - PR (valores médios de 3 repetições).....	79
Tabela 9. Índice de rugosidade superficial do solo (NEEA) na safra 2020/2021.....	80
Tabela 10. Índice de rugosidade superficial do solo (NEEA) na safra 2021/2022.....	81
Tabela 11. Índice de rugosidade superficial do solo (IDR-Paraná) na safra 2020/2021.....	82
Tabela 12. Índice de rugosidade superficial do solo (IDR-Paraná) na safra 2021/2022.....	83

MESSA, Vinícius Rigueiro. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro - 2024. **Matéria orgânica e resiliência de Latossolos argilosos sob sistema plantio direto**. Orientador: Dr. Deonir Secco. Coorientadores: Dra. Araceli Ciotti de Marins e Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior.

RESUMO

O objetivo deste trabalho visa avaliar a campo as implicações do teor de matéria orgânica do solo (MOS) na resiliência de Latossolos argilosos sob sistema plantio direto (SPD) submetido a estados de compactação no solo (0, 1, 3 e 5 passadas de um trator). O experimento foi desenvolvido no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA) - UNIOESTE, *campus* Cascavel - PR e no Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) - polo regional de Santa Tereza do Oeste - PR, nas safras de soja, 2020/2021 e 2021/2022. As áreas do NEEA e do IDR-Paraná possuem teor médio de MOS de 2,5% e 4,5% respectivamente. No Capítulo 1 foram realizadas avaliações da subsuperfície do solo antes e após o estabelecimento dos estados de compactação e após a colheita da soja, avaliando-se os atributos físico-hídrico do solo: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat), nas camadas do solo de 0-0,3 m, correlacionando estes atributos com a produtividade da soja. No Capítulo 2 foram realizadas avaliações da superfície do solo através de um perfilômetro antes e após o estabelecimento dos estados de compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja, avaliando-se os índices de rugosidade da superfície do solo (IR), o percentual residual da deformação do solo ($P_{\text{residual-DS}}$) e o percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{\text{recuperação-DS}}$). O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso. Utilizou-se o software Sisvar versão 5.6 para análise dos dados. Aplicou-se o teste Tukey ($p < 0,05$). Os resultados do Capítulo 1 mostraram que as áreas do NEEA e do IDR-Paraná apresentaram resiliência física, conforme o teor de MOS. Os ciclos de umedecimento/secamento do solo contribuíram para a recuperação das deformações impostas pelos estados de compactação estabelecidos. A Ksat após a compactação foi reduzida, entretanto, após a colheita, a mesma se restabeleceu nas duas áreas. Os tratamentos não comprometeram a produtividade da soja, sobretudo nas áreas experimentais do IDR-Paraná com maior teor de MOS. Os resultados do Capítulo 2 evidenciaram que o solo das áreas do IDR-Paraná obteve aproximadamente 1,0% de recuperação do IR a mais em relação as áreas do NEEA. O $P_{\text{residual-DS}}$ das áreas do IDR-Paraná foi de 58,33% e as áreas do NEEA de 59,27%. O $P_{\text{recuperação-DS}}$ das áreas do IDR-Paraná foi de 41,67%, enquanto nas áreas do NEEA foi de 40,73%, evidenciando maior capacidade regenerativa do solo das áreas do IDR-Paraná devido ao maior teor de MOS. Os ciclos de umedecimento/secamento do solo favoreceram a ação da expansão do solo devido a elasticidade condicionada pela MOS.

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

PALAVRAS-CHAVE: estrutura do solo; elasticidade do solo; sistema conservacionista; tráfego de máquinas; compactação.

MESSA, Vinícius Rigueiro. Western Paraná State University, February - 2024.
Organic matter and resilience of clayey oxisols under no-tillage system.
Advisor: Dr. Deonir Secco. Co-advisors: Dra. Araceli Ciotti de Marins and Dr.
Luiz Antônio Zanão Júnior.

ABSTRACT

The objective of this work aims to evaluate in the field the implications of soil organic matter (SOM) content on the resilience of clayey Oxisols under no-tillage system (NTS) subjected to states of soil compaction (0, 1, 3 and 5 passes of a tractor). The experiment was carried out at the Experimental Center for Agricultural Engineering (NEEA) - UNIOESTE, *campus* Cascavel - PR and at the Institute of Rural Development of Paraná (IDR-Paraná) - regional pole of Santa Tereza do Oeste - PR, in the soybean harvests, 2020 /2021 and 2021/2022. The NEEA and IDR-Paraná areas have an average SOM content of 2.5% and 4.5% respectively. In Chapter 1, evaluations of the soil subsurface were carried out before and after the establishment of compaction states and after soybean harvest, evaluating the physical-water attributes of the soil: soil density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi) and saturated soil hydraulic conductivity (Ksat), in soil layers of 0-0.3 m, correlating these attributes with soybean productivity. In Chapter 2, soil surface evaluations were carried out using a profilometer before and after the establishment of compaction states, after each soil wetting/drying cycle and after the soybean cultivation cycle, evaluating the roughness indices (IR), of the soil surface, the residual percentage of soil deformation ($P_{\text{residual-DS}}$) and the percentage of recovery of soil deformation ($P_{\text{recovery-DS}}$). The experimental design was entirely randomized. Sisvar software version 5.6 was used for data analysis. The Tukey test was applied ($p < 0.05$). The results of Chapter 1 showed that the areas of NEEA and IDR-Paraná presented physical resilience, according to the SOM content. The soil wetting/drying cycles contributed to the recovery of deformations imposed by the established states of compaction. Ksat after compaction was reduced, however, after harvesting, it was reestablished in both areas. The treatments did not compromise soybean productivity, especially in the experimental areas of IDR-Paraná with the highest SOM content. The results of Chapter 2 showed that the soil in the IDR-Paraná areas obtained approximately 1.0% more IR recovery compared to the NEEA areas. The $P_{\text{residual-DS}}$ of the IDR-Paraná areas was 58.33% and the NEEA areas was 59.27%. $P_{\text{recovery-DS}}$ in the IDR-Paraná areas was 41.67%, while in the NEEA areas it was 40.73%, showing greater soil regenerative capacity in the IDR-Paraná areas due to the higher SOM content. Soil wetting/drying cycles favored the action of soil expansion due to elasticity conditioned by SOM.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001”

KEYWORDS: soil structure; soil elasticity; conservation system; machine traffic; compaction.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 O solo como ambiente.....	3
2.2 Latossolos e sua mineralogia.....	3
2.2.1 Mecânica dos Solos Coesos e sua interação com a umidade.....	5
2.3 Dinâmica do solo: Interface máquina-solo.....	6
2.4 Compressibilidade do solo.....	8
2.5 Compactação do Solo.....	9
2.6 Agricultura conservacionista: Sistema Plantio Direto (SPD).....	11
2.7 Qualidade do Solo (QS).....	12
2.8 Qualidade Física do Solo.....	12
2.8.1 Estrutura do Solo.....	13
2.8.2 Agregação do Solo.....	14
2.8.3 Consistência do Solo.....	15
2.8.4 Densidade do Solo.....	15
2.8.5 Porosidade do Solo.....	16
2.8.6 Infiltração de Água no Solo.....	17
2.8.7 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado (Ksat).....	17
2.9 Aporte da Matéria Orgânica do Solo (MOS).....	19
2.9.1 Mecanismos de Estabilização do COS.....	21
2.10 Resiliência de Latossolos Argilosos.....	22
2.10.1 MOS X Elasticidade do Solo.....	23
2.11 Índice de Rugosidade da Superfície do Solo (IR).....	23
2.12 Soja.....	25
2.13 Considerações Finais.....	26
3. CAPÍTULO 1. RESILIÊNCIA DE LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB ESTADOS DE COMPACTAÇÃO: RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL E PRODUTIVIDADE DA SOJA.....	27
3.1 INTRODUÇÃO.....	29
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.2.1 Localização e descrição das áreas de estudo.....	30
3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	32
3.2.3 Semeadura, manejo fitossanitário e colheita da soja.....	34
3.2.4 Dados pluviométricos durante o ciclo da soja.....	35
3.2.5 Atributos físico-hídrico do solo.....	35
3.2.6 Análise estatística.....	37
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
3.3.1 Atributos físico-hídrico do solo.....	37
3.3.2 Produtividade da soja.....	45
3.4 CONCLUSÕES.....	46

4. CAPÍTULO 2. RESILIÊNCIA DE LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB ESTADOS DE COMPACTAÇÃO: RECUPERAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES SUPERFICIAIS	47
4.1 INTRODUÇÃO.....	49
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	50
4.2.1 Localização e descrição das áreas de estudo	50
4.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	50
4.2.3 Precipitação, temperatura mínima e máxima e umidade relativa média próximas as leituras do perfilômetro	51
4.2.4 Determinação da recuperação superficial do solo	53
4.2.5 Leituras perfilômetro das áreas experimentais (NEEA e IDR-Paraná) nas duas safras (2020/2021 e 2021/2022)	55
4.2.6 Análise estatística	55
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.3.1 Recuperação superficial do solo	56
4.4 CONCLUSÕES.....	59
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
Anexo 1	77
Anexo 2	78
Anexo 3	79
Anexo 4	80

1. INTRODUÇÃO GERAL

A economia brasileira está baseada na produção agrícola oriunda de áreas manejadas sob sistema plantio direto (SPD) conceituado como um complexo de preceitos conservacionistas (DENARDIN et al., 2012). Os resíduos vegetais constituem fator fundamental para o sucesso do SPD por proporcionar um ambiente favorável ao crescimento vegetal e por contribuir para a estabilização da produção ao longo dos anos, assim como para a recuperação ou manutenção da qualidade do solo em termos físicos, químicos e biológicos do solo (BRÜGGEMANN, 2011; DENARDIN et al., 2012; LEPSCH, 2016).

Entretanto, os Latossolos argilosos sob SPD normalmente apresentam camadas compactadas em subsuperfície do solo (BRÜGGEMANN, 2011) mediante ao tráfego de máquinas agrícolas, indiscriminadamente, sob condições inadequadas de umidade do solo, havendo redução do espaço poroso do solo, atribuído ao novo arranjo das partículas e de seus agregados (REICHERT et al., 2007), estando vinculado a textura, conteúdo de água e ao estado de compactação inicial do solo. Toigo (2010), relata que o solo possui capacidade de suportar pressão, porém, quando é superior a capacidade suporte, o solo tende a compactar (DENARDIN et al., 2012), comprometendo a produtividade das culturas, dentre elas a soja (EMBRAPA, 2018).

De acordo com Braida et al. (2011), o aumento no teor de MOS nos solos sob SPD, permitem maior estabilidade do sistema poroso, cimentação entre as partículas do solo, estabilidade estrutural, elasticidade do solo, denominada de resiliência física (KLEIN, 2014), podendo ser avaliada por meio da determinação do índice de rugosidade do solo, ou seja, capacidade do solo em recuperar seu estado prévio à compactação. O comportamento elástico do solo é afetado por sua composição, principalmente através do teor de MOS e de argila e por propriedades altamente variáveis, como condição de umidade e estado estrutural do solo. Portanto, em áreas manejadas sob SPD, a compactação tende a diminuir no tempo, devido, ao aumento da MOS, melhorando a agregação, aumentando sua porosidade, tornando-se importante para mitigar o impacto negativo que a compactação em subsuperfície provoca na estrutura do solo (BRAIDA et al., 2011; DENARDIN et al., 2012; KLEIN, 2014; LEPSCH, 2016).

A hipótese da pesquisa é que solos com maior teor de MOS possuem maior resiliência, assim, os efeitos dos danos inerentes ao manejo do solo são menos acentuados nestes solos.

Desse modo, o objetivo geral da presente pesquisa foi avaliar a campo as implicações do teor de MOS na resiliência de Latossolos argilosos sob SPD submetido a estados de compactação no solo, e os objetivos específicos foram avaliar a cada ciclo de umedecimento e secamento do solo a recuperação das deformações superficiais impostas nos diferentes estados de compactação, relacionar o teor de MOS a sua capacidade regenerativa por meio de atributos físicos do solo associadas à sua estrutura e correlacionar a produtividade da soja entre os estados de compactação para averiguar a relação entre a resiliência física do solo x produtividade da soja x teor de MOS.

Para isso, a tese foi dividida em dois capítulos. O Capítulo 1 trata de avaliações da subsuperfície do solo antes e após o estabelecimento dos estados de compactação e após a colheita da soja, avaliando-se os atributos físico-hídrico do solo associados à estrutura: densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (M_a), microporosidade (M_i) e a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}), nas camadas do solo de 0-0,3 m de profundidade, correlacionando-os com a produtividade da soja. O Capítulo 2 se volta à avaliações de superfície do solo. Na superfície do solo foram realizadas avaliações através de um perfilômetro antes e após o estabelecimento dos estados de compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja, em que calculou-se os índices de rugosidade da superfície do solo (IR), o percentual residual da deformação do solo ($P_{residual-DS}$) e o percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{recuperação-DS}$).

Assim, com esta pesquisa, espera-se gerar informações norteadoras de manejo do solo e proporcionar maior conscientização dos produtores rurais da região Oeste do Paraná, da importância e necessidade de elevar o teor de MOS para minimizar o impacto negativo do tráfego de máquinas na estrutura do solo, especialmente nos períodos de colheita dos cultivos agrícolas, quando geralmente não é observada às condições de umidade do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O solo como ambiente

O solo pode ser definido como a parte superficial da crosta terrestre intemperizada não consolidada, sendo formada através da fragmentação/decomposição das rochas de origem por agentes do intemperismo tais como a água, vento, clima e organismos, e aliado a isso, o tempo proporciona o acúmulo de material orgânico sobre a camada de rocha decomposta, enriquecendo a camada de solo recém-formada. A ação conjugada dos fatores de formação (material de origem, clima, organismos, relevo e tempo) e pedogenética (adição, perda, transporte e transformação) determina a natureza do solo e o seu perfil, constituído por horizontes superficiais, com maior acúmulo de MOS, e profundos, por partes fragmentadas da rocha de origem (BRAIDA et al., 2011; KLEIN, 2014; LEPSCH, 2016; JURY; STOLZY, 2018).

Entretanto o solo liga-se a geologia e a biologia, não sendo, portanto, apenas uma massa inerte de detritos, mas um ambiente heterogêneo, com a parte sólida mineral (45%), o espaço poroso (50%) com gases e água e a MOS em torno de 5% do solo (KLEIN, 2014; LEPSCH, 2016; JURY; STOLZY, 2018).

A parte sólida é formada pelas partículas de minerais e materiais orgânicos. A parte líquida do solo está sempre disputando o espaço poroso com a parte gasosa, nos ciclos de umedecimento e secamento. O espaço poroso depende do arranjo de partículas minerais e orgânicas do solo, que podem estar em diferentes estados de compactação (KLEIN, 2014; LEPSCH, 2016).

2.2 Latossolos e sua mineralogia

O termo “Latosol” deriva de “laterite” e “solum”, ambos de origem latina, significando, respectivamente, material altamente intemperizado. O conceito inicial dos Latossolos, correspondem aos Oxisols, Sols Ferralitiques e Ferralsols (SÉGALEN, 1994), cujas características encontravam-se relacionadas à capacidade de troca de cátions (CTC), relações moleculares sílica/óxidos de Fe e Al. Estes solos tendem a homogeneizar características químicas, morfológicas e mineralógicas, razão pela qual têm mineralogia relativamente simples.

Os Latossolos compõem a principal classe de solo no estado do Paraná, sendo distribuído em 31% do território estadual. Da área de Latossolos no estado do Paraná, mais de 65% correspondem aos Latossolos Vermelhos Distróficos e Distroféricos, com coloração mais vermelha na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B. Característicos de regiões de clima tropical, os Latossolos possuem textura argilosa, com predominância de argilominerais do tipo 1:1, não expansivos, como a caulinita (SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008; EMBRAPA, 2018), cuja expansibilidade do solo dá-se exclusivamente através do teor de MOS e ciclos de umedecimento e secamento do solo (HAAS; HORN, 2022; REICHERT et al., 2022). A unidade estrutural básica das caulinitas é constituída de uma camada de tetraedros de sílicio e uma camada de octaedros de alumínio (HAAS; HORN, 2022; REICHERT et al., 2022).

São solos profundos, com horizonte B latossólico (Bw) muito espesso (A+B normalmente superior a três metros) (EMBRAPA, 2018). A mudança entre os horizontes A, B e C é difícil de ser observada, devido à transição gradual ou difusa. As cores variam de vermelhas muito escuras a amareladas, geralmente escuras no A, vivas no B e mais claras no C. São solos com boa estruturação, muito porosos e permeáveis, baixa variação dos teores de argila entre os horizontes (BHERING; SANTOS, 2008), apresentando distribuição uniforme de argila ao longo do perfil, elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila (SÉGALEN, 1994). Na sua fração grosseira (silte + areia) prevalece quartzo. Na fração argila prevê o domínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, capeando minerais de argila, e menores proporções de outros componentes como gibbsita, goethita e hematita (KER, 1997), a depender do tipo de material de origem, com destaque para o basalto (EMBRAPA, 2018).

De forma dominante, tendem a ocupar áreas de topografia plana ou suavemente ondulada, e constitui-se uma das principais classes de solos utilizadas com agricultura tecnificada devido a facilidade de correção da fertilidade quando for o caso e a possibilidade ampla de mecanização (KER, 1997). Em sua maioria, são propensos à compactação em razão da coesividade de suas partículas. Solos com horizontes subsuperficiais endurecidos de alta coesão entre as partículas - duros, muito duros e extremamente duros, quando secos, e friáveis quando úmidos - são conhecidos no Brasil como solos coesos.

O caráter coeso é um inibidor físico que pode afetar a produção agrícola por conta da elevada resistência do solo à penetração, particularmente quando seco, o que prejudica a infiltração de água, o desenvolvimento radicular das plantas e a absorção de nutrientes. Em virtude do trânsito de máquinas em condições inadequadas de umidade tem favorecido sua compactação, ainda que apresentem boas propriedades físicas (EMBRAPA, 2018).

2.2.1 Mecânica dos Solos Coesos e sua interação com a umidade

A mecânica dos solos é a ciência que estuda a reação de fluxo e deformação dos materiais sujeitos a tensões externas através do tráfego de máquinas e implementos, pisoteio animal ao longo do tempo, resultando em uma resistência do solo que pode ser definida quantitativamente como a máxima tensão que um solo pode suportar sem apresentar falha (ruptura, fragmentação ou fluxo). Logo, os solos exibem função de fluxo, incluindo elasticidade, plasticidade e viscosidade (SOBUCKI et al., 2022; REICHERT et al., 2022).

Na escala micromecânica, os solos são definidos como materiais viscoelásticos, cuja deformação consiste de parte elástica e plástica. O solo possui vários estados de transição entre elasticidade e plasticidade, dependendo da pressão aplicada, deformação, intensidade, tempo e/ou frequência (PÉRTILE et al., 2016; REICHERT et al., 2018). O comportamento micromecânico do solo, ou seja, os parâmetros reológicos do solo, estão relacionados às propriedades físico-químicas, arranjo das partículas, concentração volumétrica de sólidos, características físicas das partículas, tais como, a distribuição granulométrica, densidade, forma, interação entre as partículas, umidade do solo, mineralogia, conteúdo de MOS (BAUMGARTEN; DÖRNER; HORN, 2013).

Os parâmetros reológicos de cisalhamento e viscoelasticidade respondem de forma diferente em relação ao teor de MOS. A microestrutura se recupera mais rapidamente em solos com maior aporte de MOS. Solos coesivos, com maiores teores de argila e aporte de carbono orgânico do solo (COS) e menor Ds são reologicamente mais estáveis, logo a perda de COS reduz a resistência microestrutural e a elasticidade dos solos (HAAS; HORN, 2022).

Reichert et al. (2018) e Jinxiao et al. (2021) observaram que a elasticidade e resistência ao cisalhamento foi maior no solo em que continha maior teor de argila, capacidade de troca catiônica, área superficial específica e MOS devido a sua ação agregadora e propriedades cimentantes, proporcionando maior estabilidade mecânica do solo em termos de resistência de partículas e agregados do solo contra tensões de cisalhamento que refletem os componentes elásticos e plásticos da deformação do solo, reduzindo o nível de estresse.

Portanto, a compreensão das interações entre os teores de COS, a mecânica e estabilidade do solo é útil para compreender e quantificar as dinâmicas do solo complexas, em relação as interfaces máquina-solo que refletem nas propriedades físicas, químicas, biológicas e hidráulicas do solo (REICHERT et al., 2022; MONDAL; CHAKRABORTY, 2022).

2.3 Dinâmica do solo: Interface máquina-solo

A principal causa da compactação dos solos agrícolas sob SPD é o tráfego de máquinas agrícolas sob condições de umidade inadequada, e em sua maioria montados sobre rodados pneumáticos. O processo de compactação promove alterações negativas nas propriedades físicas do solo, alterando o estado de compactação do solo e que representa o grau de consolidação dos constituintes do solo. Portanto, a dinâmica do solo pode ser definida como a relação entre as forças que são aplicadas e a reação do solo (FUENTES-LLANILLO et al, 2021; MONDAL; CHAKRABORTY, 2022).

Esta reação é associada às tensões no solo e sua distribuição. Os conceitos de tensão e deformação são fundamentais, juntamente com as teorias de elasticidade e plasticidade, originadas no campo da resistência dos materiais e utilizadas na dinâmica do solo, para estabelecer bases teóricas dos fenômenos de reação do solo às pressões impostas, como no caso dos rodados (pneus) das máquinas agrícolas. Deve-se considerar que as características mecânicas dos solos agrícolas variam entre as diferentes classes de solos e, para um mesmo solo, mediante a sua consistência (BIRIS et al., 2011; BERISSO et al., 2013).

Entre os aspectos relativos à dinâmica do solo importantes para o entendimento da interface máquina-solo, encontram-se as relações de tensão-deformação (falhas por cisalhamento e compressão), além de parâmetros

compostos como a resistência do solo à penetração e a sua capacidade de suporte (BIRIS et al., 2011; BERISSO et al., 2013). Além do mais, o solo não apresenta homogeneidade horizontal ou vertical, e que algumas de suas propriedades são significativamente influenciadas pelo teor de água (BIRIS et al., 2011; BERISSO et al., 2013).

Logo, as pressões aplicadas sobre a superfície do solo são distribuídas ao longo do perfil em função das tensões e deformações em maior ou menor escala de acordo com as características físicas do solo. A carga dinâmica, a pressão interna dos pneus e as múltiplas passadas afetam a D_s , variando-a significativamente ou não de acordo com o tipo de solo. É fato que o uso intensivo de máquinas e implementos na agricultura moderna podem modificar as propriedades do solo, em relação àquelas de seu estado natural. Têm sido detectadas camadas compactadas subsuperficiais do solo, degradando a macroestrutura do solo (FUENTES-LLANILLO et al, 2021).

Horn et al. (1991) e Hartge e Horn (1999) afirmam que o fator de concentração de pressão não é uma constante, pois a gênese do solo, a água armazenada ou a interferência de fatores antropogênicos, tais como a utilização de máquinas agrícolas são alterados. As máquinas agrícolas geram inúmeros pontos de pressão, que são distribuídos sob a área de contato, provocando o recalque do solo, que conforme Horn et al. (1991) é uma designação técnica com base no conceito de mecânica do solo e trata-se do rebaixamento do solo pelos rodados, causando uma redução de volume e macroporos, com expulsão do ar e água neles existentes. Coleti e Demattê (1982) verificaram que a tendência dos valores de D_s é aumentar com a intensidade do tráfego, sendo que aproximadamente 50% a 60% da compactação do solo se manifestaram com as primeiras passadas, assim como visto por Koger; Burt; Trowse (1985).

Contudo, à medida que o número de passadas no mesmo local aumenta, há aumento cada vez menos acentuado na compactação, seguindo uma escala logarítmica (JAKOBSEN; GREACEN, 1985; KOGER; BURT; TROUSE, 1985).

Raper et al. (1995) afirmaram que a pressão interna e a carga dinâmica afetam a área de contato roda-solo. A pressão interna tem papel fundamental na área de contato entre o pneu e o solo, além da distribuição de pressão na sua superfície. O nível de compactação superficial depende da pressão de contato,

enquanto a compactação subsuperficial depende da área de contato, largura do pneu e da compressibilidade do solo (LEE; KIM, 1997).

2.4 Compressibilidade do solo

A compressibilidade vem sendo usada para estimar a suscetibilidade à compactação em diferentes sistemas de manejo (AJAYI et al., 2009). Pode-se definir a compressibilidade do solo como sendo a facilidade do solo não saturado decrescer de volume quando sujeito a pressões (GUPTA; ALLMARAS, 1987) de fatores internos e externos (LEBERT; HORN, 1991). Os fatores internos são influenciados mediante o histórico de tensão, umidade, textura, estrutura, densidade inicial e mineralogia do solo e os fatores externos são caracterizados pela intensidade e frequência de carga aplicada (AJAYI et al., 2009).

Para Debiasi et al. (2008), a forma mais eficaz para prevenir a compactação do solo está relacionada com a capacidade de suporte do solo, a qual pode ser estimada pela pressão de pré-consolidação, que é um indicador de máxima carga a qual o solo já foi submetido e que separa as deformações elásticas (reversíveis) das deformações plásticas (irreversíveis). Fritton (2008), avaliando medidas para evitar a compactação do solo, concluiu que a pressão de pré-consolidação é um parâmetro apropriado para estimar a pressão que pode ser aplicada no solo, portanto, pressões transmitidas ao solo acima do valor da pressão de pré-consolidação geram compactação adicional. Silva et al. (2006) verificaram que à medida que aumentava o teor de água do solo, reduziam a pressão de pré-consolidação e acrescentava o índice de compressão do solo, indicando menor capacidade de suporte de carga e maior compressibilidade do solo, respectivamente (DEBIASI et al., 2008).

De acordo com Dias Júnior et al. (2002), solos que nunca sofreram uma pressão prévia podem ter uma curva de compressão linear, porém, solos que já experimentaram pressões prévias ou ciclos de umedecimento e secamento, possuem curva de compressão secundária (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996; AJAYI et al., 2009), que determina os estados de pressões experimentados no passado, zona em que o solo deve ser cultivado ou trafegado sem sofrer degradação estrutural adicional (DEBIASI et al., 2008; KUHN et al., 2022).

2.5 Compactação do Solo

A compactação do solo apresenta inter-relações com a maioria dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, acarretando em um rearranjo mais denso das partículas do solo e consequente redução da Pt, especificamente da Ma, alterando a estabilidade estrutural e a geometria porosa do solo, promovendo descontinuidade de poros, aumento na resistência à penetração e diminuição na difusão de gases e infiltração de água, aumentando a possibilidade de escoamento e perda de água e solo por processos erosivos (BLUM et al., 2014; DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014; LIMA; SILVA; GIAROLA, 2017).

Conforme McPhee et al. (2020), o aumento na massa das máquinas ocasiona o declínio na funcionalidade do solo, mediante redução da sua capacidade de suporte, acarretando o deslocamento e ordenação das partículas sólidas nos espaços porosos (ÇELIK et al., 2020; GURGEL et al., 2020; SPLIETHOFF et al., 2020; BARETA JUNIOR et al., 2021). De acordo com Massad (2010), a água tem um efeito lubrificante entre as partículas de solo, aproximando as partículas com a aplicação de cargas, alterando a estrutura do solo, especialmente os macroagregados formados biologicamente, formando agregados densos, com poucos poros inter-agregados e de menor diâmetro (HORN et al., 1995; HORN, 2003), principalmente pela existência de camadas compactadas em subsuperfície, restringindo o oxigênio na rizosfera e o volume de solo ocupado por raízes das plantas, com seu crescimento em superfície.

Isto posto, ocorre modificações morfológicas e fisiológicas como o aumento da razão córtex/cilindro vascular, a fim de se adaptar, aumentando o gasto energético das plantas, na procura de camadas de menor resistência, dificultando a expressão de seu potencial produtivo (GURGEL et al., 2020; BARETA JUNIOR et al., 2021), comprometendo o metabolismo das plantas (QUEIROZ-VOLTAN; NOGUEIRA; MIRANDA, 2000), como visto por Bergamim (2018), reduzindo a absorção de água e de nutrientes (KELLER et al., 2019), tornando-as mais suscetíveis ao estresse ambiental, principalmente hídrico, visto que a impedância mecânica diminui a taxa de divisão celular e reduz o comprimento da célula do meristema radicular (BENGOUGH et al., 2011),

comprometendo o contato e a absorção dos elementos minerais pelas raízes das plantas na solução do solo (GURGEL et al., 2020; BARETA JUNIOR et al., 2021).

Dentre os fatores extrínsecos que causam compactação estão a largura e diâmetro dos pneus, pressão de inflação dos mesmos, distribuição de peso por eixo, velocidade de deslocamento dos maquinários, tipo da carga aplicada (estático ou dinâmico), a duração e quantidade de pressão aplicada, e o manejo inadequado do solo aliado ao tráfego em condições de umidade do solo fora da ideal, que é no estado de consistência do solo friável (DUNCAN; WRIGHT; BRANDON, 2014; TOKURA et al., 2021), conforme os limites de Atterberg, que relatam a dependência entre umidade e capacidade de suporte do solo. Kretschmer (1996) descreve que os limites estão baseados no teor de água, estabelecendo o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP).

Entretanto, os fatores intrínsecos do solo envolvidos situam-se a D_s inicial, teor de argila, agregação e mineralogia (AJAYI et al., 2009), distribuição e tamanho dos poros, conteúdo e tipo de substâncias orgânicas, potencial hidráulico do solo (BRAIDA et al., 2008), ciclos de umedecimento e secamento, expansão e contração da massa do solo, MOS e umidade do solo. Silva et al. (2006) encontraram que a MOS tem um impacto positivo propiciando rápida redução da compactação, fazendo com que esta reduza. A interação positiva entre o material orgânico e a compactação do solo é explicada pelo aumento da área específica do solo, trazendo como consequência, maior retenção de água o que incrementa os valores dos limites de plasticidade do solo. Os autores observaram, também, uma correlação entre o acréscimo do conteúdo de MOS e a ampliação da faixa de friabilidade, a qual é associada como a faixa de umidade na qual o maquinário agrícola pode entrar no campo com menor risco de compactar o solo (BARETA JUNIOR et al., 2021; TOKURA et al., 2021).

Portanto, para uma agricultura conservacionista é necessário conhecer a dinâmica do solo e as intensidades de compactação suportada pelo solo, e o momento adequado para realizar as operações de manejos agrícolas.

2.6 Agricultura conservacionista: Sistema Plantio Direto (SPD)

O SPD é um sistema de manejo do solo, que visa a sustentabilidade dos agroecossistemas (DERPSCH et al., 2010). No mundo, mais de 150 milhões de hectares de solo são cultivados sob SPD (KASSAM et al., 2015) e mais de 31,8 milhões de hectares são cultivados sob este sistema no Brasil. No Brasil essa técnica teve início nos anos 60. Os primeiros registros da adoção do SPD no Paraná datam do início da década de 1970. Desde então, o estado se tornou referência na implementação e nas tecnologias que envolvem o SPD visando minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão, em decorrência da intensidade das operações agrícolas no sistema de preparo convencional aliado à elevada erosividade das chuvas (DERPSCH et al., 2010).

Dentre as vantagens do SPD estão: Evitar o impacto direto da gota da chuva, regular a temperatura do solo, conservar a umidade do solo, aumentar o teor de COS com a não-mobilização do solo, resultando em maior resistência do solo à compactação e uma melhoria do estado de consistência do solo, agregação e de estabilidade dos agregados, aumentando o volume de poros, com redução da D_s , proporcionando aumento na aeração, infiltração e disponibilidade de água no solo, e acessibilidade a absorção de nutrientes (HOBBS; SAYRE; GUPTA, 2008), além de ser fonte de energia para os microrganismos do solo, elevando a atividade microbiológica do solo, diminuindo a lixiviação, aumentando a CTC. Ademais, reduz a infestação de ervas daninhas, e as taxas de perdas de água disponível às plantas por erosão, ganho de tempo para a semeadura, economia de combustível, melhor estabelecimento da cultura, economia de mão-de-obra de máquinas agrícolas (HOBBS; SAYRE; GUPTA, 2008; DERPSCH et al., 2010; BÜNEMANN et al., 2018).

As mudanças no uso do solo como a utilização do SPD, é a mais significativa nos últimos anos, especialmente quando se tratam de solos localizados em climas tropicais e subtropicais a fim de evitar o esgotamento da MOS (BÜNEMANN et al., 2018). Mansano (2020) expõe que, o surgimento do SPD no Brasil houve uma evolução na agricultura brasileira, quanto à produtividade e em relação à conservação do solo. E para que o SPD seja sustentável e não haja a descontinuidade, deve-se priorizar seus princípios básicos, como o mínimo revolvimento do solo, apenas na linha da semeadora-

adubadora, cobertura permanente sobre a superfície do solo e a rotação de culturas, a fim de aportar carbono ao longo do tempo, e ampliar e preservar a qualidade do solo (DERPSCH et al., 2010; BÜNEMANN et al., 2018).

2.7 Qualidade do Solo (QS)

O conceito de QS está intimamente ligado aos manejos do solo adotados. Esta expressão foi usada inicialmente na década de 1970 e ganhou força nos anos noventa. Doran (1997), afirma que a QS é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, ou seja, a capacidade do solo exercer suas funções, como proporcionar o crescimento das plantas, regular e compartimentar o fluxo de água no ambiente, controle de temperatura, oxigênio, baixa resistência a penetração, estocar água, nutrientes e energia, servir como tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (BÜNEMANN et al., 2018).

Entretanto, o solo é considerado um sistema vivo em constante evolução, e no funcionamento ideal do solo, os atributos físicos, químicos e biológicos estão em equilíbrio. Logo, na natureza, o solo comporta-se como um sistema aberto, trocando matéria e energia com o meio, atingindo estado estável quando as taxas de adição e de perdas se equivalem (BÜNEMANN et al., 2018).

2.8 Qualidade Física do Solo

A física do solo estuda e define, qualitativa e quantitativamente, as propriedades físicas, bem como sua medição, predição e controle, com o objetivo principal de entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos e seu papel na biosfera. A variabilidade espacial das propriedades físicas do solo, mediante as interações com as propriedades químicas e biológicas que ocorrem concomitantes e ao longo do tempo, pode contribuir para as estratégias do manejo sustentável do solo, tornando-se relevante estudar os indicadores de qualidade física do solo (KARLEN et al., 1997; REINERT; REICHERT, 2006).

Os principais indicadores físicos de QS, sob o ponto de vista agrônomo, são: estrutura do solo, agregação do solo, consistência do solo, densidade do

solo, porosidade do solo, infiltração da água no solo, condutividade hidráulica do solo saturado, rugosidade superficial do solo e o sistema de cultivo, que tem grande influência sobre todos os demais (REINERT; REICHERT, 2006). Os indicadores de QS, sob hipótese nenhuma devem ser avaliados de maneira isolada. Logo, a decisão sobre quais práticas de manejo conservacionistas utilizar constitui-se fator-chave para o solo expressar sua resiliência.

2.8.1 Estrutura do Solo

A estrutura do solo é resultado de processos dinâmicos que se alteram naturalmente ao longo do espaço e do tempo por meio de ações químicas, físicas, biológicas e antrópicas (JURY; HORTON, 2004; BRONICK; LAL, 2005), promovendo o arranjo das partículas sólidas em agregados e do espaço poroso entre elas. É o resultado da agregação das partículas primárias e secundárias, sendo que as primárias são isoladas, ao passo que as secundárias são formadas por um conjunto de estruturas primárias dentro de um agregado, mantido por agentes cimentantes, como a MOS. Entretanto, pode ser descrita morfológicamente quanto à sua forma em: laminar, prismática, colunar, blocos angulares, blocos subangulares e granulares (REINERT; REICHERT, 2006; JIN et al., 2011; BRADY; WEIL, 2013; TASSINARI et al., 2017).

À vista disso, os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas, de maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas. Logo, a qualidade da estrutura do solo é fundamental para o suprimento de água, oxigênio, baixa resistência a penetração às raízes, controle de temperatura e nutrientes. Melhorias na estrutura do solo, estabilidade de agregados, são obtidas em sistemas conservacionistas, como o SPD e a adoção de sistemas de rotação de culturas, utilizando-se dos benefícios advindos das plantas em termos de adição de resíduos culturais e de ação das raízes, seja no enredamento, por raízes fasciculadas, como na abertura de canais, por raízes pivotantes (JIN et al., 2011).

A manutenção do sistema radicular vivo de um ano para o outro e sua contínua e gradual renovação possibilitam que as raízes sejam mais eficazes na

agregação pela ação mecânica de enredamento mediante ação de mucilagens de polissacarídeos e por ação de ciclos de umedecimento e secamento. Entretanto, a melhoria da qualidade física do solo em áreas sob SPD de longo prazo tem sido atribuída à presença de agregados maiores e mais estáveis, em face do incremento de MOS e a atividade da mesofauna e raízes de culturas, que promovem uma rede de bioporos com maior continuidade e conectividade ao longo da matriz do solo, com reflexos no movimento de água (STRUDLEY; GREEN; ASCOUGH, 2008; JIN et al., 2011) e ar (CARTER, 1992) no solo (YAZDANPANA; MAHMOODABADI; CERDÀ, 2016).

2.8.2 Agregação do Solo

A agregação do solo é um processo hierárquico de formação da estrutura, originado da interação de processos físicos, químicos e biológicos no solo (MONDAL; CHAKRABORTY, 2022), ou seja, os agregados são formados pela união das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) que se juntam por meio da atuação de microrganismos, compostos orgânicos liberados através do sistema radicular e pela própria MOS, formando, dessa forma, estruturas responsáveis para a proteção do carbono e a manutenção de uma qualidade ideal do solo para o desenvolvimento das plantas e microrganismos.

Primeiramente, ocorre a formação de microagregados, pela aproximação de partículas de argila ligadas por cátions e compostos orgânicos. Depois disso, o processo de agregação resulta em macroagregados (MONDAL; CHAKRABORTY, 2022). Como resultado da formação de agregados, o material orgânico fica protegido no seu interior, tornando-se menos vulnerável ao acesso microbiológico e mineralização (TASSINARI et al., 2017). Essa proteção física, têm demonstrado uma relação direta entre o teor de COS e o índice de estabilidade de agregados. Portanto, o manejo adequado do solo pode aumentar a agregação do solo que resultam no acúmulo de carbono (C) em diferentes frações da MOS (TASSINARI et al., 2017; KHAIDAPOVA; CHESTNOVA, 2017; STOPPE; HORN, 2018; MONDAL; CHAKRABORTY, 2022). Assim, a estabilidade dos agregados é crucial para determinar o tempo de permanência

do COS e sua taxa de decomposição (TASSINARI et al., 2017; KHAIDAPOVA; CHESTNOVA, 2017; STOPPE; HORN, 2018).

Diante disto, a matriz mineral-orgânica e o espaço poroso, formado através da organização dos agregados, é fundamental caracterizar a dinâmica da qualidade estrutural do solo (BAVOSO et al., 2012; BRADY; WEIL, 2013; TASSINARI et al., 2017; STOPPE; HORN, 2018).

2.8.3 Consistência do Solo

A consistência do solo é a manifestação das forças físicas de coesão e adesão entre as partículas do solo em diferentes níveis de umidade, e pode ser definida como a resposta do solo à ação das forças externas que tendem a deformá-lo, as quais podem ocasionar fluxo, fratura ou compressão do solo. Os pontos de transição dos diferentes estados de consistência são denominados de “limites de Atterberg”. Os estados de consistência podem ser sólido (duro), semissólido (friável), plástico e líquido. A umidade do solo, à base de massa, do ponto de transição entre o estado semissólido e o plástico é denominada de “limite de plasticidade” (LP) e a umidade do solo no ponto de transição entre o estado plástico e o líquido, de “limite de liquidez” (LL) (KIEHL, 1979).

A força de adesão é a força resultante da atração entre dois materiais não semelhantes, como, por exemplo, entre solo e superfícies líquidas. A força de adesão do solo, se dá por meio de filme de água, que envolve as partículas de solo. Quanto menores forem às partículas, maior será a força de adesão. Por isso, solos argilosos possuem maior adesão do que solos arenosos. A força de coesão é a força resultante entre partículas iguais (água-água ou solo-solo). Quando o solo está úmido, a coesão se dá pelas forças de tensão superficial da água, pelas forças de Van der Waals e por efeitos cimentantes da MOS, além de forças advindas de cargas das partículas de solo (KIEHL, 1979).

2.8.4 Densidade do Solo

A D_s pode ser definida como a razão da massa do solo seco pelo volume ocupado por este solo. É um atributo naturalmente variável, entre solos de

classes diferentes em função da sua textura, teores de MOS, estrutura e mineralogia. Valores elevados de D_s caracterizam a compactação do solo, impedimento mecânico do solo à penetração das raízes, e conseqüentemente do desenvolvimento das plantas (REICHERT; REINERT; BRAIDA, 2003).

Os valores de D_s agrícolas variam de 0,90 a 1,80 Mg m^{-3} , dependendo da textura e do teor de MOS (KLEIN, 2014). Solos com maior teor de argila e de MOS apresentam D_s menor. Solos argilosos comumente apresentam grande quantidade de microagregados do solo ($< 1,00$ mm) extremamente estáveis, o que não permite a acomodação das partículas. A porosidade interna desses microagregados é a responsável por essa menor densidade. A MOS apresenta densidade menor do que 1,0 Mg m^{-3} , o que reduz a D_s . Conforme Reichert et al. (2009), quando a macroporosidade for inferior a 10% e a D_s entre 1,25 e 1,35 Mg m^{-3} , em solo argiloso, pode ocorrer restrições ao crescimento radicular e afetar a produtividade das culturas. A D_s ideal e crítica para Latossolo Vermelho visto por Klein (2006) foi de 1,08 e 1,33 Mg m^{-3} respectivamente.

2.8.5 Porosidade do Solo

A porosidade do solo é representada pelos espaços do solo ocupados por água e/ou ar. A distribuição do diâmetro (\emptyset) dos poros condiciona o comportamento físico-hídrico. O solo ideal deve apresentar um volume e dimensão dos poros adequados para a entrada, movimento e retenção de água e ar (HILLEL, 1998). Klein e Libardi (2002), classificam como macroporos, os poros com $\emptyset (\geq 50 \mu\text{m})$, responsáveis pela aeração do solo, trocas gasosas, controle de temperatura e infiltração de água no solo.

De acordo com Reinert e Reichert (2006), a M_a em 10% é suficiente para a demanda respiratória do solo, sendo uma boa indicadora da condição estrutural do solo. Alterações na estrutura do solo ocasionadas pela compactação do solo, especificamente em regiões úmidas, reduzem a M_a . Logo, os microporos, aqueles com $\emptyset (\leq 50 \mu\text{m})$, que conforme a Embrapa (1979), considera à classe de \emptyset de poros que retém água no solo.

2.8.6 Infiltração de Água no Solo

A infiltração é a entrada de água no solo através da superfície (interface solo/atmosfera) no sentido vertical descendente. A quantidade de água que atravessa uma unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo é denominada taxa de infiltração. Com o transcorrer do tempo, a taxa de infiltração vai diminuindo, tendendo para uma taxa constante de infiltração, que será igual à máxima condutividade hidráulica da camada limitante (LIBARDI, 2010).

Seven e Germann (1981) destacam que a eficiência da infiltração da água no solo por meio dos macroporos ou canais biológicos é altamente influenciado pelo sistema de microporos circunvizinhos. Essa afirmativa ressalta a importância da determinação da K_{sat} , pois, após o sistema de macroporos estar “saturado”, o fator que comandará o fluxo descendente de água no solo e o consequente “esvaziamento” destes poros ou canais será a condutividade do sistema de poros ao redor deles. Deve-se levar em consideração a umidade inicial do solo, pois na fase inicial do processo de infiltração, ocorre, primeiramente, a saturação dos poros. Quanto maior o volume de poros sem água, maior será a capacidade de absorção. Depois de saturados, começará a fase de condução (condutividade) propriamente dita (LIBARDI, 2010).

Na condição ideal de umidade, a capacidade de campo, existe água retida nos poros de menor \emptyset , sendo que a água livre nos poros de maior \emptyset ($\geq 50 \mu\text{m}$) foi drenada para as camadas mais profundas. Logo, no ponto de murcha, apesar de existir uma quantidade de água retida nos poros (\emptyset efetivo $\leq 0,2 \mu\text{m}$), as plantas não conseguem absorvê-la. Neste contexto, fatores como a porosidade e a estrutura do solo são essenciais porque definem a capacidade de infiltração, o movimento e a capacidade de armazenagem de água no perfil do solo (SILVA; REICHERT; REINERT, 2006; LIBARDI, 2010).

2.8.7 Condutividade Hidráulica do Solo Saturado (K_{sat})

Este atributo físico-hídrico representa a facilidade com que o solo transmite água. De modo geral, seu valor é usado nos cálculos de fluxos de água no solo. O valor máximo de K_{sat} é atingido quando o solo se encontra saturado (REICHARDT, 1990). Conforme Reichardt (1996), Henry Darcy, em 1856, foi o

primeiro a estabelecer uma equação que possibilitou a quantificação do movimento de água em materiais porosos saturados. A K_{sat} sofre influência de atributos do solo tais como: estrutura, textura, massa específica do solo, massa específica das partículas, P_t , M_a e M_i (REICHARDT, 1990; ELLIES; GREZ; RAMIREZ, 1997; SCHERPINSKI et al., 2010; LIBARDI, 2010), manejo, composição granulométrica e o teor de MOS.

Alteração na estrutura do solo, tal como o grau de compactação, influencia diretamente a K_{sat} , devido ao importante efeito no \emptyset dos poros, podendo obter valores com várias ordens de grandeza. Isto pode ser um indicativo de que a propriedade não é representada por uma distribuição de probabilidade simétrica, haja vista que a K_{sat} é determinada pela geometria dos poros preenchidos com água, tornando-se dependente, portanto, da forma, quantidade, distribuição e continuidade dos mesmos (LIBARDI, 2010; SCHERPINSKI et al., 2010).

A medida da K_{sat} e da M_a são provenientes do mesmo espaço poroso, desta forma, entre estas variáveis, é de se esperar que haja uma correlação, uma vez que são relatadas, inclusive, para uma mesma escala de comprimento interno da geometria dos poros do solo. Portanto, a relação existente entre a K_{sat} e a M_a deve ser descrita considerando as diferentes distribuições das variáveis. A densidade de fluxo de água que passa por um poro é proporcional ao quadrado de seu \emptyset (Lei de Poiseville), e por estas razões é possível obter valores discrepantes para K_{sat} , enquanto a macroporosidade não apresentará a mesma tendência (LIBARDI, 2010).

Como a K_{sat} depende, em grande parte, da forma e continuidade dos poros, a mesma varia fortemente de um local a outro, e difere também para as distintas orientações do solo, o que pode levar à assimetria. De modo geral, os maiores valores de K_{sat} são encontrados juntamente com os maiores valores de porosidade. Porém, Bouma (1982), relata que pequenos poros podem conduzir mais água quando são contínuos, enquanto poros maiores podem não contribuir para o fluxo de água quando apresentam descontinuidade no solo. Portanto, o manejo do solo altera a estrutura do solo e influencia diretamente a K_{sat} .

2.9 Aporte da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

A MOS é resultado da decomposição síntese e re-síntese de resíduos vegetais (SILVA; RESCK, 1997). As substâncias orgânicas presentes no solo vão desde materiais livres e com elevada biodisponibilidade, até componentes quimicamente mais estáveis, em íntima associação com a fase mineral (CHRISTENSEN, 1992). Apesar de encontrar-se em torno de 1% a 5% de MOS na maioria dos solos agrícolas, a mesma exerce importante função na manutenção da QS, uma vez que influencia os principais processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no mesmo (PILLON et al., 2007). Cerca de 90% da estrutura da MOS é composta por (52%-58%) de carbono, (34%-39%), de O₂, (3,7%-4,15%) de nitrogênio e (3,3%-4,8%) de hidrogênio (HUNGRIA et al., 1997; PILLON et al., 2007; CERRI et al., 2010; MASCIANDARO et al., 2018).

O carbono é o elemento base, no qual são constituídas todas as moléculas orgânicas (ADUAN; VILELA; REIS JÚNIOR, 2004). A maior parte do C da superfície do planeta (entre 85% e 95%) encontra-se na MOS. A MOS, possuindo em média 58% de C, é indispensável para a manutenção da vida no solo. O fator de Van Bemmelen (1,724) pode ser adotado para converter carbono orgânico total (COT) em MOS (ADUAN; VILELA; REIS JÚNIOR, 2004). A bioestrutura dos solos está baseada na presença de MOS, em decomposição ou humificada (PRIMAVESI, 2002; MASCIANDARO et al., 2018; ARCOVERDE; SOUZA; RAFULL, 2020).

Em geral, a MOS é dividida em duas frações: a MOS viva e a MOS não viva. A MOS viva constitui aproximadamente 5% do COS, sendo composta por raízes de plantas (5%-10%), macrofauna do solo (15%-30%) e microrganismos do solo (60%-80%). A MOS não viva constitui aproximadamente 95% do COS e compreende a MOS leve, os compostos orgânicos dissolvidos e a MOS estabilizada no solo ou húmus (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992).

A MOS leve ou fração lábil compreende cerca de 10% a 30% do COT do solo e é constituída por resíduos de plantas recém-adicionados ao solo, em diferentes estágios de decomposição (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992) e curto período de permanência no solo (WOLF; SNYDER, 2003). Sua principal função do ponto de vista agrônômico é fornecer nutrientes às plantas por meio do processo de mineralização, promovido pelos organismos do solo ou, do ponto

de vista ecológico, servir como base da cadeia alimentar dos organismos do solo. O termo húmus é usado de forma generalizada para designar substâncias não húmicas e húmicas presentes no solo (RESENDE et al., 2007).

As substâncias não húmicas são grupos de compostos orgânicos bem definidos (proteínas e aminoácidos, carboidratos simples e complexos, resinas, ligninas, lipídeos, ácidos orgânicos, ácidos nucleicos entre outros) e representam de 10% a 15% da reserva total do COT nos solos minerais (CAMARGO; SANTOS; GUERRA, 1999). As substâncias húmicas (SH) constituem a maior parte do COT nos solos, de 85% a 90%, subdividindo-se em três principais frações, tais como, os ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e a humina (HAYES; CLAPP, 2001; MOREIRA; SIQUEIRA, 2002; BLANCO-CANQUI et al. 2009).

Alem do mais, o aumento do teor de MOS, proporciona aumento no estoque de C no solo resultando na retirada de CO₂ da atmosfera e contribuindo para a mitigação do efeito estufa, e a agregação do solo, aumentando a capacidade de suporte de carga dos solos, bem como a resiliência do solo às cargas aplicadas (BRAIDA et al., 2010), visto que o aumento da concentração do COS, reduz a Ds devido a sua baixa densidade, elevada área superficial específica, propriedades elásticas e elevada capacidade de absorção de água pela MOS. Contudo, proporciona aumento na porosidade total do solo, preservando a umidade do solo, além de controlar a temperatura do solo, e acrescentar da taxa de infiltração e proteção do solo contra erosão (BLANCO-CANQUI et al. 2009; ARCOVERDE; SOUZA; RAFULL, 2020).

Entretanto, o aporte de MOS no solo, contribui para os parâmetros químicos. Além do aumento da CTC, contribui para a melhoria da fertilidade, redução de íons metálicos e possível elevação do pH do solo. Além disso, auxilia nos parâmetros biológicos, especificamente na expansão da biomassa microbiana do solo (ABIVEN; MENASSERI; CHENU, 2009; BRAIDA et al., 2010; CERRI et al., 2010; MASCIANDARO et al., 2018).

Contudo, a relação entre os atributos físicos, químicos e biológicos do solo e o COS nas camadas do solo, justifica o benefício do seu influxo no solo. Portanto, deve-se proporcionar condições no sistema-solo, a fim de estabilizá-lo no solo (VON-LUTZOW et al., 2006; CERRI et al., 2010).

2.9.1 Mecanismos de Estabilização do COS

O aumento do estoque de C, especialmente em regiões tropicais, é lento e necessita de manejo adequado, já que a taxa de decomposição é acelerada devido as altas temperaturas e umidade do solo. Para isso, práticas conservacionistas contribuem para o controle da temperatura do solo, por manter o solo coberto por plantas ou resíduos de cobertura, propiciando isolamento térmico (IAMAGUTI et al., 2015), o que pode atenuar a emissão de CO₂ e proporcionar a estabilização da MOS (FRIEDLINGSTEIN et al., 2019).

No entanto, este estoque de carbono do solo não é fixo ou permanente, é um equilíbrio dinâmico com outros sistemas terrestres. Consequentemente, ações que alteram o uso do solo também alteram os estoques de carbono do solo, e influenciam os níveis de carbono atmosférico e, assim, por extensão, o sistema climático global (FRIEDLINGSTEIN et al., 2019). No entanto, para que ocorra incremento de COS no solo é necessário aumentar o aporte de resíduos orgânicos e diminuir as taxas de saída de C, correspondentes às perdas por erosão, mineralização, respiração microbiana, e lixiviação de compostos orgânicos solúveis (SOLLINS; HOMANN; CALDWELL, 1996; DAVIDSON; JANSSENS, 2006). A estabilização da MOS é inversamente relacionada com o potencial de oxidação do material. É influenciada por características intrínsecas do solo e pelas práticas de manejo. Os mecanismos envolvidos na estabilização da MOS são a estabilidade por interação com os minerais do solo ou estabilização química e bioquímica e a proteção física em agregados do solo (SIX et al., 2002; DAVIDSON; JANSSENS, 2006).

A estabilização química, ocorre mediante a ligações químicas e físico-químicas entre substâncias orgânicas e inorgânicas do solo que diminuem as taxas de degradação das moléculas orgânicas devido à complexação dos grupos funcionais e mudanças na conformação molecular, formando complexos organo-minerais (KAISER; GUGGENBERGER, 2003). A estabilização bioquímica é decorrente da composição química recalcitrante das moléculas dos compostos orgânicos todavia, a proteção física em agregados, forma-se uma barreira para os microrganismos decompositores. No entanto, esta separação é didática, pois os mecanismos de estabilização atuam ao mesmo tempo em todos os estágios

de decomposição (RAZAFIMBELO et al., 2008; FRIEDLINGSTEIN et al., 2019), contribuindo para o aumento da resiliência dos solos agrícolas.

2.10 Resiliência de Latossolos Argilosos

A teoria da resiliência foi descrita primeiramente por Holling em 1973 (BUSCHBACHER, 2014), sendo definida como a habilidade de um sistema em manter a sua estrutura organizacional e desempenhar suas funções após sofrer uma perturbação (LIN, 2011; CABELL; OELOFSE, 2012; ALTIERI; KOOHAFKAN; NICHOLLS, 2014; NICHOLLS et al., 2015).

Na ciência do solo, o termo resiliência refere-se a capacidade que um solo apresenta de recuperar sua integridade estrutural e funcional após sofrer um estresse (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009), a qual pode ser de origem antropogênica ou natural, e retornar a um novo equilíbrio, semelhante à condição ou estado antecedente (BAVOSO et al., 2012). Para Addiscott (1995), o solo não degradado tem propriedades auto-reguladoras para manter seu estado atual. Se um solo em seu estado estável é perturbado, seus mecanismos de regulação agirão para contrapor a perturbação e restaurá-lo a um estado estável. Assim, a resiliência depende do balanço entre os processos de degradação e de restauração do solo (BLANCO-CANQUI; LAL, 2010; BAVOSO et al., 2012).

Ademais, solos com alto conteúdo de MOS e elevada estabilidade de agregados têm maior resiliência que solos instáveis com baixo teor de MOS. Os fatores que governam a resiliência dos solos são também os mesmos da formação do mesmo, sendo que alguns fatores podem ter maior influência que outros dependendo do tipo de solo. Estes fatores e processos que afetam a resiliência são contínuos, simultâneos e independentes (BLANCO-CANQUI; LAL, 2010). Dörner et al. (2009) concluíram que a resiliência funcional dos solos está relacionada com o conteúdo de MOS, que atua como componente elástico e permite a recuperação volumétrica do solo.

2.10.1 MOS X Elasticidade do Solo

A fração argila dos Latossolos intemperizados é constituída por uma mineralogia predominantemente caulinítica, contendo hematita, goethita e gibbsita (RESENDE et al., 2005), em que sua expansibilidade é função exclusivamente do teor de MOS. Os materiais orgânicos podem atuar de duas formas na atenuação do processo de compactação ou seus efeitos. Quando na superfície do solo, dissipam parte da pressão exercida pelas rodas das máquinas e, quando incorporados à MOS, aumenta a elasticidade do solo e a resistência à compactação bem como os limites de umidade em que o solo pode ser trabalhado mecanicamente (HILLEL, 1998; PERDOK; KROESBERGEN; HOOGMOED, 2002; BRAIDA et al., 2006; DÖRNER et al., 2009).

Vincula-se, ainda, a elasticidade ao aumento do teor de MOS, geralmente observado na camada superficial no SPD. Considerando que o acúmulo de MOS está associado ao aumento da água retida no solo (SCHEINOST; SINOWSKI; AUERSWALD, 1997; TORMASELLA; HODNETT; ROSSATO, 2000), ter-se-iam dois efeitos que explicam maior elasticidade nos solos enriquecidos com MOS: elasticidade da própria MOS, que é mais elástica que as partículas minerais e o aumento da probabilidade do confinamento de bolhas de ar no seu interior durante a aplicação de uma carga que, ao cessar esta carga (pressão), aliado a ciclos de umedecimento e secamento, se expandem, promovendo a elasticidade do material que o compõe, que dependerá de sua natureza, orgânica e/ou mineral, do tamanho das partículas, do estado de decomposição do material orgânico e da mineralogia da fração mineral, que proporcionarão alterações no índice de rugosidade da superfície do solo (IR) (BRAIDA et al., 2006; BLANCO-CANQUI; LAL, 2010; BAVOSO et al., 2012).

2.11 Índice de Rugosidade da Superfície do Solo (IR)

A terminologia “rugosidade superficial do solo” foi utilizada inicialmente por Kuipers (1957) com a finalidade de avaliar quantitativamente o microrrelevo do solo. A caracterização da rugosidade do solo é freqüentemente estabelecida pelas medidas das elevações da superfície do solo em áreas de 0,1 a 4,0 m², com um “*grid*” de espaçamento em que as medidas variam de 10 a 100 mm

(LINDEN; VAN DOREN, 1986; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010) a fim de descrever as variações da rugosidade superficial do solo em decorrência das diferentes operações de preparo e da ação das chuvas que ocorrem ao longo do tempo.

À vista disso, o IR é representado através do microrrelevo do solo, também sendo chamado, independentemente da escala (métrica ou submétrica), de microtopografia da superfície do solo distribuídas espacialmente, expressa por fatores intrínsecos do solo, como teor de água no momento do preparo (ELTZ; NORTON, 1997; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010), porosidade, granulometria, estrutura do solo, MOS (TACONET; CIARLETTI, 2007), assim como, depende de fatores extrínsecos, como as precipitações pluviais, quantidade e forma de manejo do resíduo vegetal e intensidade do preparo mecânico (BERTOL et al., 2006), além de depender da compactação do solo (ZOLDAN JÚNIOR et al., 2008; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010).

O microrrelevo do solo influencia a quantidade de água que pode ficar retida nas depressões durante e após uma chuva. As pequenas depressões retêm por mais tempo a água empoçada na superfície, retardando o início do escoamento e reduzindo a velocidade e a energia cinética do escoamento, diminuindo, assim, o arraste e a dispersão de agregados pela enxurrada. Em adição, o microrrelevo causa aprisionamento de sedimentos, reduzindo as perdas de solo da lavoura. É afetado pela D_s , porosidade do solo, e a estabilidade de agregados em água, os quais dependem do manejo do solo. Os preparos de solos conservacionistas caracterizam-se, em geral, por ser mais resilientes, devido ao seu maior teor de MOS (ZOLDAN JÚNIOR et al., 2008).

Os ciclos de umedecimento e secamento, são um fenômeno essencial para a resiliência física do solo pois permitem que a superfície do solo mantenha sua rugosidade próxima da natural (VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010). Entretanto, são raras as pesquisas quanto às alterações das propriedades da superfície do solo, como a rugosidade decorrente das operações de preparo, na superfície e a ação da recuperação do solo, especificamente de Latossolos, mediante expansibilidade do solo, através da MOS (ZOLDAN JÚNIOR et al., 2008).

2.12 Soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) pertence à família das leguminosas, classe *Magnoliopsida*, ordem *Fabales*, família *Fabaceae*, gênero *Glycine* e tem origem o continente Asiático, na China (SEDIYAMA; SILVA; BORÉM, 2015).

Conforme a Conab (2024), é uma das principais *commodities* globais. No Brasil, é a principal cultura em termos de área e volume de produção. Na safra 2023/2024 a produtividade média foi de 3.251 kg ha⁻¹.

Em relação a exigência hídrica da soja, verifica-se que a água é responsável por 90% do peso da soja, além de ter a função de solvente de nutrientes e gases, está presente, direta ou indiretamente, em todos os processos fisiológicos e bioquímicos da planta como balanço energético, fotossíntese, respiração, turgescência, regulação térmica da planta através do resfriamento e na distribuição do calor (FARIAS et al., 2009; EMBRAPA, 2018).

A necessidade total de água pela cultura varia entre 450 a 800 mm⁻¹ por ciclo de cultivo para alcance do máximo rendimento, de acordo com a cultivar, manejo cultural e condições climáticas para o cultivo (EMBRAPA, 2018).

Entretanto, a compactação devido ao uso excessivo de máquinas e implementos agrícolas pesados nas áreas de cultivo, aumentam a impedância mecânica dos solos agrícolas intensamente cultivados influenciando negativamente o crescimento e a produção da soja por ter uma influência maior no crescimento das raízes, variando de acordo com o regime de chuvas registrado, e a temperatura, fator ambiental que tem influência considerável na morfologia das culturas (SMUCKER, 2022; CAPOBIANGO et al., 2023).

Shin et al. (2020) verificaram que o componente rendimento e a qualidade da soja são afetados por alta temperatura e pela seca. Burroughs et al. (2023) constataram que temperaturas mais elevadas na época de cultivo reduzem o rendimento da soja. Embora o número de nós do caule tenha aumentado com o acréscimo da temperatura, o índice de área foliar diminuiu substancialmente. A produção de vagens, o tamanho das sementes e o índice de colheita diminuíram significativamente com o aumento da temperatura. Jumrani et al. (2022) avaliaram doze genótipos de soja cultivados em estufas a uma temperatura média de 26, 29, 32 e 35 °C. Houve redução de 8% e 14% quando cultivados a

26 e 29 °C, respectivamente. Foi observado um declínio severo de 51% e 65% no rendimento a 32 e 35 °C, respectivamente.

Ferreira et al. (2023) avaliaram o desempenho agronômico e fisiológico de diferentes cultivares de soja em função da compactação sob plantio direto (SPD) com textura franco-argilosa. A fotossíntese líquida, a condutância estomática e as taxas de transpiração foram reduzidas em até 50% sob compactação e não foram influenciadas pelas cultivares.

Mustafa et al. (2023) verificaram que o peso de sementes/vagem e o peso de 100 sementes tiveram correlação negativa com o aumento da temperatura. O número de folhas e sementes/vagem teve correlação positiva e significativa com o peso de 100 sementes, o que significa que um aumento nessas características traria benefícios em termos de produtividade.

2.13 Considerações Finais

Os Latossolos compõem a principal classe de solo no Paraná. Em sua maioria são propensos à compactação em razão da coesividade de suas partículas laminares. No entanto, o SPD contribui para a evolução na agricultura brasileira, principalmente em relação à conservação do solo. No SPD com qualidade há maior influxo de MOS, com efeito cimentante, contribuindo na manutenção da estrutura do solo e proporcionando um solo fisicamente mais resiliente, cuja recuperação do solo pode se dar por processos de expansão e contração do solo, provocada por ciclos de umedecimento/secamento.

3. CAPÍTULO 1. RESILIÊNCIA DE LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB ESTADOS DE COMPACTAÇÃO: RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL E PRODUTIVIDADE DA SOJA

MESSA, Vinícius Rigueiro. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro - 2024. **Resiliência de Latossolos argilosos sob estados de compactação: recuperação estrutural e produtividade da soja.** Orientador: Dr. Deonir Secco. Coorientadores: Dra. Araceli Ciotti de Marins e Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior.

RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) pode propiciar maior capacidade regenerativa estrutural frente aos estados de compactação estabelecidos por sistemas de cultivo. O objetivo deste trabalho foi correlacionar a capacidade regenerativa estrutural de dois Latossolos argilosos sob estados de compactação (0, 1, 3 e 5 passadas de um trator) e teores de MOS com a produtividade da soja. O experimento foi desenvolvido nas áreas experimentais do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, *campus* Cascavel - PR e nas áreas experimentais do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) - polo regional de Santa Tereza do Oeste - PR. Em ambos os locais o solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), de textura argilosa a muito argilosa. As áreas do NEEA e do IDR-Paraná possuem teor médio de MOS respectivamente de 2,5% e 4,5%. A resiliência do solo foi avaliada nas safras de cultivo da soja, 2020/2021 e 2021/2022. Antes da semeadura da soja, em ambas as áreas experimentais foram estabelecidos estados de compactação no solo através da passagem de um conjunto trator-pulverizador, (John Deere 7515) 600L carregado, com a umidade do solo próximo do limite de plasticidade, em que se obtém a máxima compactação do solo. Na subsuperfície do solo antes e após o estabelecimento dos estados de compactação e após a colheita da soja, foram avaliados os atributos físico-hídrico do solo: densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat), nas camadas do solo de 0-0,3 m, correlacionando estes atributos com a produtividade da soja. O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso. Utilizou-se o software Sisvar versão 5.6 para análise dos dados. Aplicou-se o teste Tukey ($p < 0,05$). As áreas do NEEA e do IDR-Paraná apresentaram resiliência física, conforme o teor de MOS. Os ciclos de umedecimento/secamento do solo contribuíram para a recuperação das deformações impostas pelos estados de compactação estabelecidos. A Ksat após a compactação foi reduzida, entretanto, após a colheita, a mesma se restabeleceu nas duas áreas. Os tratamentos não comprometeram a produtividade da soja, sobretudo nas áreas experimentais do IDR-Paraná com maior teor de MOS.

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

PALAVRAS-CHAVE: estrutura do solo; tráfego de máquinas; compactação.

MESSA, Vinícius Rigueiro. Western Paraná State University, February - 2024.
Resilience of clayey Oxisols under states of compaction: structural recovery and soybean productivity. Advisor: Dr. Deonir Secco. Co-advisors: Dra. Araceli Ciotti de Marins and Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior.

ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) can provide greater structural regenerative capacity in the face of compaction states established by cultivation systems. The objective of this work was to correlate the structural regenerative capacity of two clayey Oxisols under states of compaction (0, 1, 3 and 5 passes of a tractor) and SOM content with soybean productivity. The experiment was carried out in the experimental areas of the Experimental Center for Agricultural Engineering (NEEA), at the Western Paraná State University - UNIOESTE, *campus* Cascavel - PR and in the experimental areas of the Institute of Rural Development of Paraná (IDR-Paraná) - regional pole of Santa Tereza do Oeste - PR. In both locations, the soil is classified as distroferric Red Latosol (LVdf), with a clayey to very clayey texture. The NEEA and IDR-Paraná areas have an average SOM content of 2.5% and 4.5% respectively. Soil resilience was evaluated in the soybean growing seasons, 2020/2021 and 2021/2022. Before soybean sowing, in both experimental areas, states of soil compaction were established through the passage of a tractor-sprayer set, (John Deere 7515) 600L loaded, with soil moisture close to the plasticity limit, in which obtains maximum soil compaction. In the subsurface of the soil before and after the establishment of compaction states and after soybean harvesting, the physical-water attributes of the soil were evaluated: soil density (Ds), total porosity (Pt), macroporosity (Ma), microporosity (Mi) and hydraulic conductivity of saturated soil (Ksat), in soil layers of 0-0.3 m, correlating these attributes with soybean productivity. The experimental design was entirely randomized. Sisvar software version 5.6 was used for data analysis. The Tukey test was applied ($p < 0.05$). The NEEA and IDR-Paraná areas showed physical resilience, according to the SOM content. The soil wetting/drying cycles contributed to the recovery of deformations imposed by the established states of compaction. Ksat after compaction was reduced, however, after harvesting, it was reestablished in both areas. The treatments did not compromise soybean productivity, especially in the experimental areas of IDR-Paraná with the highest SOM content.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001”

KEYWORDS: soil structure; machine traffic; compaction.

3.1 INTRODUÇÃO

O aumento da massa de máquinas agrícolas e os estresses induzidos durante o tráfego indiscriminado em condições inadequadas de umidade do solo tem sido recorrente, sobretudo em operações de colheita (SCHJØNNING; LAMANDÉ, 2018; REICHERT et al., 2023). A ação de pressões externas maior do que a estrutura do solo pode suportar, resulta em degradação estrutural (KIRNAK et al., 2017; SIVARAJAN et al., 2018), devido ao incremento do estado de compactação do solo (REICHERT et al., 2023).

Desta forma a compactação do solo tem comprometido as camadas superficiais e subsuperficiais, ameaçando a sua funcionalidade (HOLTHUSEN et al., 2019; JIMENEZ et al., 2021), mediante mudanças no espaço poroso (MUJDECI et al., 2017).

O acréscimo da densidade do solo (D_s) e redução da porosidade total e, conseqüentemente da condutividade hidráulica e armazenamento de água (CAVALIERI-POLIZELI et al., 2022; REICHERT et al., 2022), proporcionam mudanças na relação solo-água-ar em resposta às características e propriedades físicas do solo (AMBUS et al., 2023). À vista disto, o aumento da impedância mecânica dos solos agrícolas, comprometem o crescimento e a produção das culturas, tais como a soja (CAPOBIANGO et al., 2023).

Desta forma, o aporte de matéria orgânica do solo (MOS), é crucial para a manutenção/melhoria da estrutura do solo e de uma porosidade contínua e conectada (AMBUS et al., 2023), ampliando a resiliência física, ou seja, a capacidade intrínseca do solo para retornar ao seu estado de equilíbrio ou semelhante, após alguma forma de estresse. Neste caso, o solo atua como um capacitor, armazenando energia e matéria e adaptando-se às mudanças impostas através do seu manejo (REICHERT et al., 2023).

Isto posto, solos argilosos com alta coesividade e maiores teores de argila, tais como os Latossolos, aliado ao aporte de MOS e menor D_s são reologicamente mais estáveis (JIMENEZ et al., 2021; REICHERT et al., 2022; SOBUCKI et al., 2022), recuperando-se mais rapidamente, devido ao aumento da estabilidade do solo pela intensificação da formação de agregados e a cimentação da MOS de aumentar a acessibilidade dos volumes de poros e a retenção de água no solo (HOLTHUSEN et al., 2019; HORN et al., 2019).

Vários autores atestam que o incremento do teor de MOS pode potencialmente ampliar a elasticidade, melhorando a resiliência do solo (AMBUS et al., 2023; REICHERT et al., 2023). Porém, os efeitos integrados de estados de compactação em áreas com diferentes teores de MOS não foram detalhadamente estudados. Não foram encontrados na literatura trabalhos que relacionassem os fatores das tendências restaurativas estruturais em Latossolos argilosos, correlacionando com a produtividade da soja.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi correlacionar a capacidade regenerativa estrutural de dois Latossolos argilosos sob estados de compactação (0, 1, 3 e 5 passadas de um trator) e teores de MOS com a produtividade da soja.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e descrição das áreas de estudo

O experimento foi desenvolvido no Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola - NEEA, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, *campus* Cascavel, PR (24°53'52" S e 53°31'55" W) e no Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) - polo regional de Santa Tereza do Oeste, PR (25°5'6,65" S e 53°35'12,98" W) baseados nos teores de MOS, em duas safras de soja, 2020/2021 e 2021/2022 (Figura 1).



Figura 1. Localização da área do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola - NEEA - Unioeste, *campus* Cascavel, PR e do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) - polo regional de Santa Tereza do Oeste, PR.

A caracterização química dos solos foram realizadas através de amostras parcialmente deformadas da camada do solo de 0-0,2 m. As coletas foram realizadas na safra 2020/2021 e avaliadas no Laboratório de Química Ambiental e Instrumental da Unioeste, *campus* Marechal Cândido Rondon, PR. Na Tabela 1 verifica-se os resultados médios dos tratamentos da área do NEEA e do IDR-Paraná (Anexo1).

Tabela 1. Caracterização química dos solos da área do NEEA e do IDR-Paraná

Camada	P	pH CaCl ₂	H + Al	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	V	Al
m	mg dm ⁻³	0,01 mol L ⁻¹	-----cmol _c dm ⁻³ -----			-----%-----			
NEEA									
0-0,2	5,65	4,88	8,00	0,08	0,6	6,03	2,18	52,38	1,16
IDR-Paraná									
	37,75	4,85	7,53	0,15	0,91	6,84	1,86	56,17	1,81

P e K (Extrator Mehlich⁻¹); Al, Ca e Mg (Extrator KCl 1 mol L⁻¹).

No NEEA e no IDR-Paraná a altitude é respectivamente de 607 m e 750 m, e umidade relativa do ar entre 75% a 80%. A declividade no NEEA é de 3%, no sentido sudoeste-nordeste e de 8%, no sentido sudeste-noroeste, em relação ao norte geográfico. No IDR-Paraná o relevo é suavemente ondulado, com declividade variando de 0,21% a 5,41%.

Os locais distam um do outro em aproximadamente 20 km. Em ambos os locais o solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico (LVdf), de textura argilosa a muito argilosa (EMBRAPA, 2018). As áreas do NEEA, vem sendo conduzidas sob sistema plantio direto (SPD) há mais de 7 anos com produção de soja e milho no verão e aveia preta no inverno e as áreas do IDR-Paraná sob SPD com rotação de cultivos comerciais e de espécies de cobertura do solo há mais de 20 anos.

A metodologia de combustão total por via seca foi utilizada para a quantificação do carbono orgânico total. Foram coletadas amostras de solo da camada do solo de 0-0,3 m dos quatro tratamentos estabelecidos (0, 1, 3 e 5 passadas) e cinco repetições cada, com auxílio de uma pá de corte e acondicionadas em sacos plásticos. As áreas do NEEA e do IDR-Paraná possuem teor médio de MOS respectivamente de 2,5% e 4,5% (Anexo 2).

As proporções relativas das frações areia, silte e argila da camada do solo de 0-0,3 m das áreas do NEEA e do IDR-Paraná foram analisadas por meio do método da pipeta, conforme USDA-Soil Conservation Service, no laboratório de Física do Solo da Unioeste, *campus* Cascavel, PR. A granulometria na área do NEEA foi de 47, 311 e 642 g kg⁻¹ para areia, silte e argila, respectivamente. Enquanto na área do IDR-Paraná, os valores foram de 36, 328 e 636 g kg⁻¹ para areia, silte e argila, respectivamente (Anexo 3).

3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso, com 5 repetições. O experimento foi conduzido nas safras de soja, 2020/2021 e 2021/2022. As dimensões das áreas foram de 40 x 30 m (Figura 2).

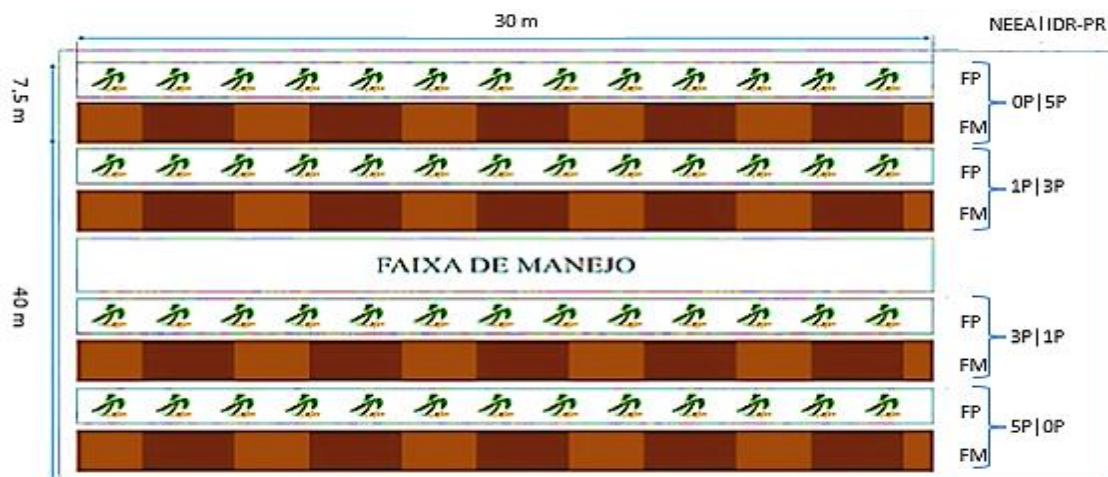


Figura 2. Croqui das áreas experimentais (NEEA/IDR-Paraná). FP: faixa de produção da soja; FM: faixa de monitoramento. 0P, 1P, 3P, 5P: número de passadas conjunto trator-pulverizador para estabelecimento dos tratamentos. Áreas mais escuras na figura, representam as repetições em cada tratamento.

Antes da semeadura da soja, nas áreas experimentais foram estabelecidos os estados de compactação no solo através de um conjunto trator-pulverizador (John Deere 7515) 600L carregado, totalizando uma pressão sobre o solo de aproximadamente $5,70 \text{ kg/cm}^2$ (peso do eixo traseiro: 6.800 Kg e área de contato: $1.192,5 \text{ cm}^2$), sendo 0, 1, 3 e 5 passadas, com a umidade do solo próxima ao limite de plasticidade, quando se obtém a máxima compactação.

3.2.3 Semeadura, manejo fitossanitário e colheita da soja

Na Tabela 2 encontram-se os dados de semeadura, manejo fitossanitário e colheita da soja das áreas experimentais do NEEA e do IDR-Paraná, nas safras 2020/2021 e 2021/2022.

Tabela 2. Dados de semeadura, manejo fitossanitário e colheita da soja

SEMEADURA DA SOJA - NEEA 2020/2021 2021/2022				
DATA	CULTIVAR	SEMENTES/ METRO	TS	ADUBAÇÃO
08/12/2020 12/10/2021	Brasmax Lança IPRO GM: 5.8	15	Standak Top + Co Mo	320 Kg ha ⁻¹ do adubo (02-24-12) 300 Kg ha ⁻¹ do adubo (08-20-20)
COLHEITA - NEEA 2020/2021 2021/2022				
05/04/2021 02/04/2022	2 linhas 3 linhas de 4 m, totalizando 3,6 m ² 5,4 m ² respectivamente			
SEMEADURA DA SOJA - IDR-Paraná 2020/2021 2021/2022				
DATA	CULTIVAR	SEMENTES/ METRO	TS	ADUBAÇÃO
08/12/2020 21/10/2021	NA 5909 RR. GM: 6.7 NS 6209. GM: 6.2	17 15	Vitavax Thiran 200 SC + Cruiser 350 FS Protreat + Cruiser 350 FS + Nitro 1000 Soja	350 Kg ha ⁻¹ do adubo (02-20-18) 350 Kg ha ⁻¹ do adubo (04-30-10)
COLHEITA - IDR-Paraná 2020/2021 2021/2022				
06/04/2021 07/03/2022	3 linhas de 4 m, totalizando 5,4 m ²			

Os manejos fitossanitários foram realizados de acordo com a necessidade da cultura da soja
Em ambas as áreas e safras o espaçamento entre linhas foi de 0,45 m

A soja foi trilhada e limpa e a umidade corrigida a 13% e os dados extrapolados para Mg ha⁻¹

TS: tratamento de sementes.

3.2.4 Dados pluviométricos durante o ciclo da soja

As informações da precipitação pluviométrica, foram obtidas com o auxílio do pluviômetro nas áreas experimentais do NEEA e da estação meteorológica do IDR-Paraná - polo regional de Santa Tereza do Oeste, PR. A temperatura média, máxima e mínima foi obtida através da estação meteorológica do IDR-Paraná - polo regional de Santa Tereza do Oeste, PR (Figura 3).

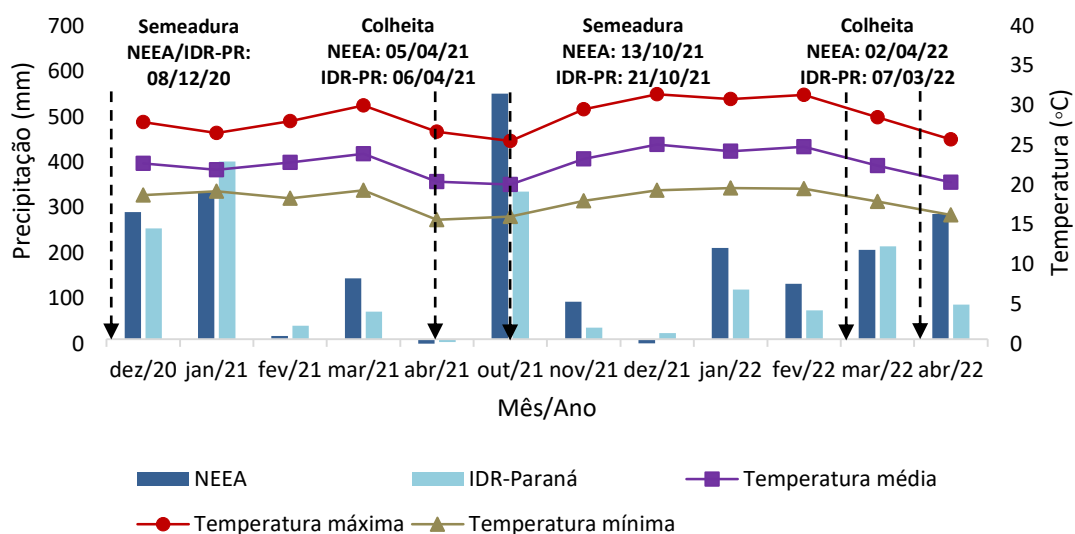


Figura 3. Precipitação de dezembro/2020 a abril/2021 (Safrá 2020/2021) e de outubro/2021 a abril/2022 (Safrá 2021/2022) do NEEA e IDR-Paraná.

3.2.5 Atributos físico-hídrico do solo

No solo, foram avaliados atributos físico-hídrico associados à estrutura: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (Pt) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat), nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, antes e após o estabelecimento dos estados de compactação e após a colheita da soja, conforme metodologia preconizada por Embrapa (2018).

Para avaliação destes atributos físico-hídrico, em cada área experimental, foram abertas trincheiras e coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos metálicos (5,0 cm de diâmetro e 5,0 cm de altura) nos quatro tratamentos, com auxílio de martelo pedológico e extrator de solo. Na sequência,

as amostras foram colocadas em latas de alumínio e transportadas para o Laboratório de Física do Solo da Unioeste, *campus* Cascavel, PR.

Os volumes de solo nas amostras foram devidamente ajustados e estas foram saturadas em água por 48 horas em um recipiente com lâmina de água a 2/3 de sua altura. Após a saturação das amostras determinou-se a K_{sat} em permeâmetro de carga constante (Figura 4).

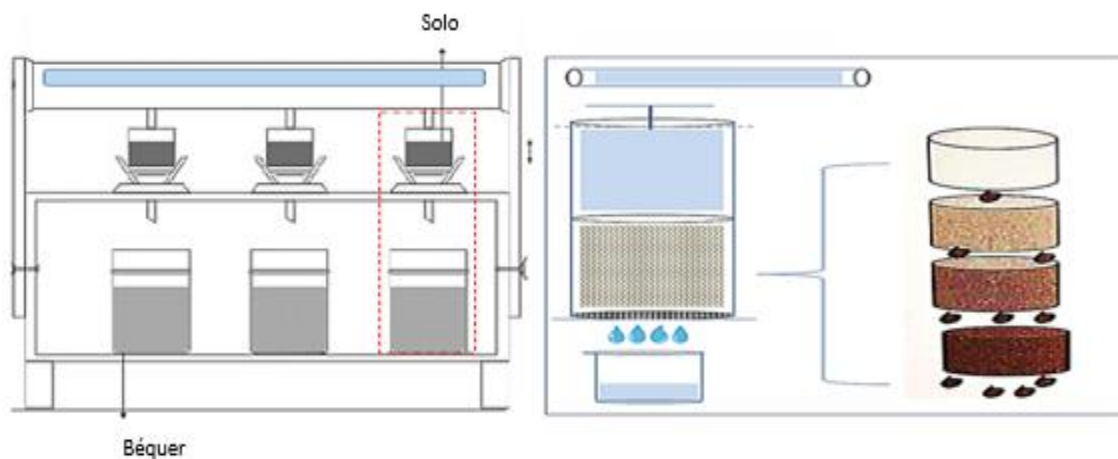


Figura 4. Condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) em permeâmetro de carga constante. Fonte: Modificado de Reinert; Reichert (2006).

O cálculo da K_{sat} foi realizado através da Equação 1:

$$K_{sat} = \frac{V_a L}{A t K_{sat} (h+L)}$$

Em que K_{sat} é a condutividade hidráulica (mm h^{-1}); V_a é o volume de água percolado (m^3) durante o tempo t_{ksat} (s); L é o comprimento da amostra (m); A é a área da seção transversal da amostra (m^2) e h é o potencial de pressão no topo da amostra (m).

Em seguida, as amostras foram novamente saturadas e submetidas a uma tensão de 6 kPa em coluna de areia (REINERT; REICHERT, 2006).

Após, as amostras foram secas a 105 °C até peso constante para determinar a D_s . A P_t foi calculada a partir dos valores de D_s e densidade de partículas (D_p). A M_i foi calculada com base na tensão volumétrica de 6 kPa, enquanto a M_a foi a diferença entre a P_t e M_i (EMBRAPA, 2018).

3.2.6 Análise estatística

Para a análise dos dados, recorreu-se ao software Sisvar versão 5.6. Os atributos físico-hídrico do solo e a produtividade da soja foram analisados aplicando-se o teste Tukey ($p < 0,05$).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Atributos físico-hídrico do solo

Na Figura 5 encontram-se os valores médios da densidade do solo (Ds) da camada de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja nas áreas do NEEA e IDR-Paraná, nas safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente.

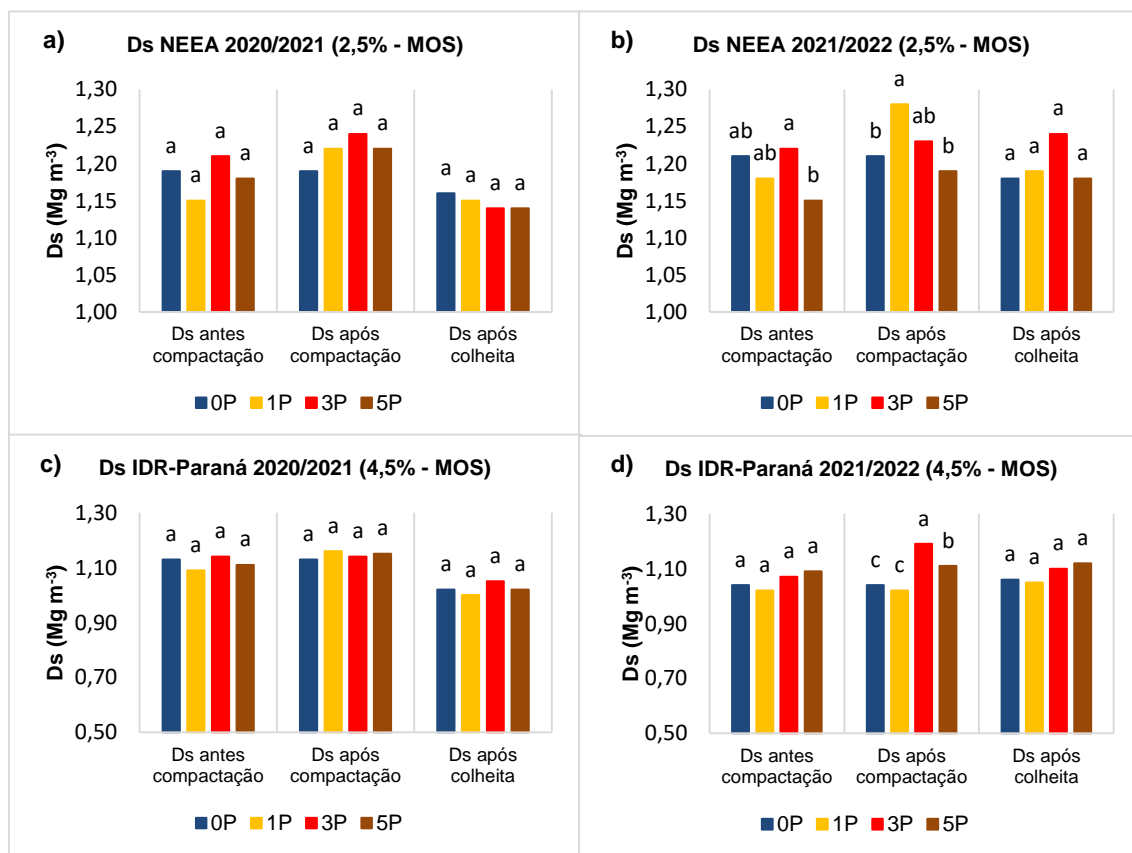


Figura 5. Valores médios da Ds das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e a colheita da soja (valores médios de 5 repetições) nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e do IDR-Paraná (c e d). Safras 2020/2021 e

2021/2022 respectivamente. Médias dos tratamentos seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Ds na área do NEEA nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja na safra 2020/2021 não apresentaram diferença significativa (Figura 5a). Logo, na safra 2021/2022, houve diferença significativa nas condições antes e após a compactação (Figura 5b).

O maior valor de Ds antes da compactação foi no tratamento com três passadas (3P) de $1,22 \text{ Mg m}^{-3}$ e o menor valor de Ds de $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ no tratamento com cinco passadas (5P). Após a compactação, os maiores valores de Ds foram nos tratamentos com uma passada (1P), de $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$, seguido do tratamento 3P, com $1,23 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 5b). Mujdeci et al. (2017) observaram valor equivalente de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ com uma passagem do trator, bem como, Naeimi et al. (2015) e Elaoud; Chehaibi; Abrougui (2015) notaram compactação mais severa na primeira passada do trator, acionando as tendências degradativas na estrutura do solo que é dinâmica, reduzindo o espaço poroso, provindo de um rearranjo mais denso das partículas do solo e agregados (HOLTHUSEN; BATISTÃO; REICHERT, 2020; REICHERT et al., 2023).

Todavia, após a colheita da soja, não houve diferença significativa entre os tratamentos, porém, observa-se redução na Ds em relação a condição após a compactação, no tratamento 1P, que passou para $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 5b).

A Ds na área do IDR-Paraná nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja na safra 2020/2021 não apresentaram diferença significativa (Figura 5c). Contudo, na safra 2021/2022, houve diferença significativa apenas na condição após a compactação, com menores valores de Ds de $1,04 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,02 \text{ Mg m}^{-3}$ nos tratamentos 0P e 1P, semelhante ao observado por Rizaldi; Putri; Rifai (2023) com Ds de $1,08 \text{ Mg m}^{-3}$, antes do estabelecimento dos estados de compactação, e os maiores valores de Ds de $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$ nos tratamentos 3P e 5P respectivamente (Figura 5d).

Além disso, notou-se que os valores de Ds após a colheita na área do IDR-Paraná com 4,5% de MOS foram menores em relação a área do NEEA com 2,5% de MOS, assim como visto por Krzic et al. (2004), ratificando que o aumento de 1% no teor de MOS diminuiu a Ds em aproximadamente 11%, semelhante ao notado em pesquisa (Figura 5), viabilizando maior estabilidade do sistema poroso, ação agregadora, cimentação entre as partículas do solo e

estabilidade estrutural (ALLOCCA et al., 2023; YUDINA; KUZUYAKOV, 2023; SEIFU et al., 2023; REICHERT et al., 2023).

Estes resultados corroboram com os dados encontrados por Haas; Horn (2022), Chao; Shi; Fowmes (2023) e Reichert et al. (2023).

Na Figura 6 encontram-se os valores médios da macroporosidade do solo (Ma) da camada de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja nas áreas do NEEA e IDR-Paraná, nas safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente.

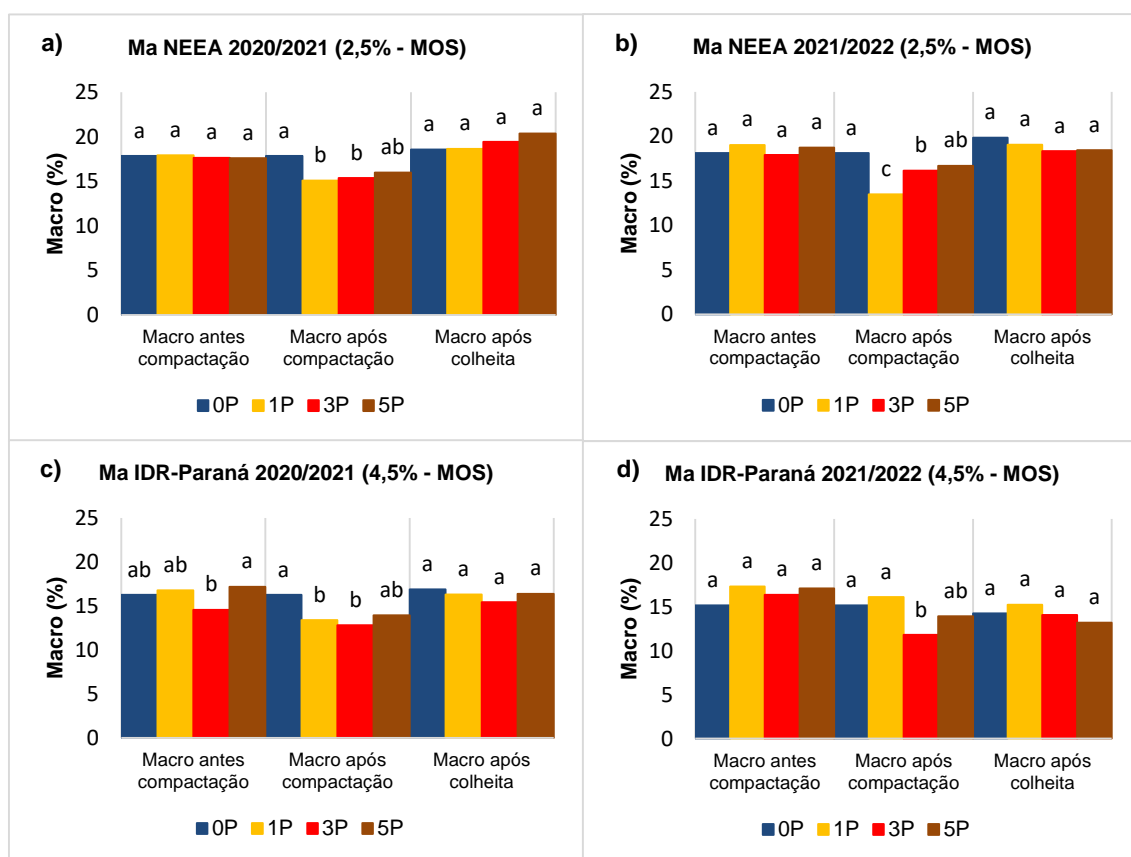


Figura 6. Valores médios da Ma das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja (valores médios de 5 repetições) nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e do IDR-Paraná (c e d). Safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente. Médias dos tratamentos seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A Ma nas áreas do NEEA nas condições antes e após a colheita da soja nas safras 2020/2021 e 2021/2022 não apresentaram diferença significativa. Entretanto, na condição após a compactação, houve diferença significativa (Figuras 6a e 6b). Os menores valores de Ma após a compactação nas safras

2020/2021 e 2021/2022 foram encontrados nos tratamentos 1P e 3P, com 15,10% e 15,36% respectivamente (Figura 6a) e 13,50% e 16,15% respectivamente (Figura 6b) mediante o recalque no solo (FU et al., 2019; ZHANG et al., 2023; TEH; WONG; LEE, 2023), degradando a macroestrutura do solo (FUENTES-LLANILLO et al., 2021; LIMA et al., 2022; MONDAL; CHAKRABORTY, 2022), visto que a compactação facilita o rearranjo estrutural do solo, tendo como consequência maior proximidade entre as partículas sólidas, resultando no restringimento da funcionalidade do sistema poroso (HUANG; HORN; REN, 2022; GHANBARIAN; LIN; PIRES, 2023).

A Ma na área do IDR-Paraná na safra 2020/2021 nas condições antes da compactação e após a compactação apresentaram diferença significativa. Todavia, após a colheita não houve diferença significativa. Na condição antes da compactação o menor valor de Ma foi no tratamento 3P com 14,57% e o maior valor de 17,17% no tratamento 5P. Entretanto, após a compactação, os menores valores de Ma foram encontrados nos tratamentos 1P e 3P com 13,37% e 12,82% respectivamente, seguido do tratamento 5P com 13,93% (Figura 6c).

A Ma na área do IDR-Paraná na safra 2021/2022 nas condições antes da compactação e após a colheita não apresentaram diferença significativa (Figura 6d), porém, após a compactação, houve diferença significativa, com os menores valores encontrados nos tratamentos 3P e 5P com 11,80% e 13,93% respectivamente e os maiores valores vistos nos tratamentos 0P e 1P com 15,18% e 16,11% respectivamente, assim como verificado por Mujdeci et al. (2017), na qual a maior Ma foi de 16% com uma passagem do trator. Isto posto, notou-se que a Ma após a compactação, apresentou redução significativa nas áreas do NEEA e IDR-Paraná em relação a condição antes da compactação, tal como, após a colheita da soja houve aumento significativo da Ma em ambas as áreas e safras em relação a condição após a compactação (Figura 6).

Na Tabela 3 encontram-se os valores médios da microporosidade do solo (Mi), porosidade total do solo (Pt) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) da camada de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja nas áreas do NEEA, nas safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente.

Tabela 3. Valores médios da Mi, Pt e Ksat do NEEA das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos 0, 1, 3 e 5 passadas nas safras 2020/2021 e 2021/2022

NEEA (2,5% - MOS)						
Tratamento	Mi (%)					
	Antes compactação		Após compactação		Após colheita	
	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022
0P	37,23 a	36,41 ab	37,23 a	36,41 a	37,75 a	35,66 a
1P	38,54 a	36,41 ab	38,84 a	38,02 a	38,09 a	35,87 a
3P	36,83 a	36,20 b	37,80 a	37,42 a	37,63 a	34,92 a
5P	37,79 a	37,93 a	38,09 a	38,38 a	36,44 a	36,88 a
Tratamento	Pt (%)					
	Antes compactação		Após compactação		Após colheita	
	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022
0P	55,08 a	54,53 a	55,08 a	54,53 a	56,33 a	55,50 a
1P	56,46 a	55,45 a	53,94 a	51,52 b	56,74 a	54,93 a
3P	54,48 a	54,11 a	53,17 a	53,57 ab	57,05 a	53,25 a
5P	55,38 a	56,67 a	54,06 a	55,08 a	56,81 a	55,36 a
Tratamento	Ksat (mm h ⁻¹)					
	Antes compactação		Após compactação		Após colheita	
	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022
0P	70,76 a	153,85 a	70,76 a	153,85 a	110,29 b	169,50 a
1P	116,62 a	35,07 a	14,74 b	0,03 b	153,56 b	33,36 b
3P	75,08 a	53,68 a	11,71 b	5,02 b	482,35 a	65,52 b
5P	163,14 a	77,28 a	23,30 b	0,48 b	321,22 ab	24,37 b

*Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

A Mi na área do NEEA, antes e após a compactação e após a colheita da soja na safra 2020/2021 não apresentaram diferença significativa. Na safra 2021/2022, antes da compactação, houve diferença significativa. O tratamento 3P expressou menor Mi com 36,20%. A Mi, após a compactação e após a colheita não houve diferença significativa (Tabela 3). Entretanto, a Mi após compactação em ambas as safras foi semelhante ao observado por Mujdeci et al. (2017) em que a Mi de 38% foi vista no tratamento com três passagens. Silva et al. (2022) ratificaram que o aumento nos estados de compactação não impactou a Mi, mas reduziu a Ma, assim como verificado em pesquisa.

A Mi apresentou comportamento contrário da Ma e Pt, com acréscimo após a compactação, evidenciando que ocorreu maior concentração de argilominerais (REICHERT et al., 2018; LIMA et al., 2022) em um mesmo volume devido a compactação imposta através do conjunto trator-pulverizador.

No entanto, houve decréscimo na Mi após a colheita da soja (Tabela 3), devido a recuperação do estado estrutural do solo, ou seja, a reorganização do sistema poroso ao longo do ciclo de cultivo da soja, mediante os efeitos dos ciclos de umedecimento/secamento do solo, aliado a elasticidade do solo propiciada pela MOS (REICHERT et al., 2018; LIMA et al., 2022; CAMARGO; CÁSSARO; PIRES, 2022), evidenciando que a funcionalidade do espaço poroso apresenta comportamento dinâmico que mudam no tempo e no espaço (REICHERT et al., 2018; TIAN et al., 2019; LIMA et al., 2022).

Na Tabela 3 verifica-se que a Pt na área do NEEA, nas condições antes e após a compactação e após a colheita na safra 2020/2021 não apresentaram diferença significativa. A Pt na safra 2021/2022, nas condições antes da compactação e após colheita da soja, não houve diferença significativa, porém, após a compactação, constatou-se diferença significativa, com menores valores encontrados nos tratamentos 1P e 3P, com 51,52% e 53,57% respectivamente, tal como ratificado por Sekwakwa e Dikinya (2012), na qual a compactação reduziu a Pt. Portanto, a Ma e a Pt, obtiveram comportamento semelhantes, com redução após a compactação e recuperação após a colheita da soja.

Todavia, a Ksat antes da compactação nas áreas do NEEA nas safras 2020/2021 e 2021/2022 não apresentaram diferença significativa, porém, constatou-se que em ambas as safras, após a compactação os valores da Ksat foram menores em relação a condição antes da compactação (Tabela 3), apresentando diferença significativa, com valores inferiores nos tratamentos 1P, 3P e 5P em relação ao tratamento zero passadas (0P), haja vista que modificações no grau da estrutura do solo refletem em aumento de poros complexos, configurando uma Ksat com diferentes proporções de fluxo de água (PETRYK et al., 2023; BÁŤKOVÁ et al., 2023). Contudo, a Ksat após a colheita da soja, em ambas as safras, houve diferença significativa, assim como, verificou-se aumento em relação a condição após a compactação.

Estes resultados corroboram com os dados encontrados por Ngo-Cong et al. (2021) e Budhathoki et al. (2022). Presume-se que o aumento da Ma pode explicar o acréscimo da Ksat, ao comparar a Ksat após a compactação e após a colheita (Tabela 3), já que são provenientes do mesmo espaço poroso (KOOL et al., 2019; KREISELMEIER et al., 2020; NGO-CONG et al., 2021) e possuem influência direta na movimentação da água no solo.

Na Tabela 4 encontram-se os valores médios da microporosidade do solo (Mi), porosidade total do solo (Pt) e condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) da camada de 0-0,3 m, dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação e após a colheita da soja nas áreas do IDR-Paraná, nas safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente.

Tabela 4. Valores médios da Mi, Pt e Ksat do IDR-Paraná das camadas de 0-0,3 m, dos tratamentos 0, 1, 3 e 5 passadas nas safras 2020/2021 e 2021/2022

IDR-Paraná (4,5% - MOS)						
Tratamento	Mi (%)					
	Antes compactação		Após compactação		Após colheita	
	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022
0P	41,03 a	45,44 a	41,03 b	45,44 a	44,57 a	45,81 a
1P	41,85 a	44,18 a	42,92 ab	45,53 a	46,04 a	45,31 a
3P	42,25 a	43,27 a	43,99 a	43,46 a	45,02 a	44,28 a
5P	40,94 a	41,86 a	42,62 ab	44,14 a	44,98 a	44,68 a
Tratamento	Pt (%)					
	Antes compactação		Após compactação		Após colheita	
	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022
0P	57,28 a	60,62 a	57,28 a	60,62 a	61,43 a	60,06 a
1P	58,63 a	61,51 a	56,29 a	61,64 a	62,35 a	60,54 a
3P	56,82 a	59,64 a	56,81 a	55,26 c	60,43 a	58,34 a
5P	58,12 a	58,95 a	56,55 a	58,08 b	61,36 a	57,88 a
Tratamento	Ksat (mm h ⁻¹)					
	Antes compactação		Após compactação		Após colheita	
	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022	2020/2021	2021/2022
0P	57,15 b	72,90 bc	57,15 a	72,90 b	195,61 b	49,25 a
1P	213,42 a	132,23 a	6,57 b	168,50 a	469,82 a	148,59 a
3P	36,02 b	106,46 ab	13,11 b	3,51 c	145,30 b	44,60 a
5P	103,47 b	60,87 c	6,55 b	32,96 bc	100,75 b	244,77 a

*Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

A Mi na área do IDR-Paraná, antes da compactação e após a colheita na safra 2020/2021 não apresentaram diferença significativa porém, após a compactação houve diferença significativa. Na safra 2021/2022, não verificou-se diferença significativa nas condições antes e após compactação e após a colheita (Tabela 4). Assim como visto na área do NEEA, a Mi na área do IDR-Paraná apresentou comportamento contrário da Ma e Pt, com acréscimo após a compactação, evidenciando que houve maior concentração de argilominerais

(REICHERT et al., 2018; LIMA et al., 2022) em um mesmo volume em virtude da compactação imposta através do conjunto trator-pulverizador.

A Pt na safra 2020/2021, nas condições antes e após compactação e após a colheita, não houve diferença significativa. Na safra 2021/2022, não constatou-se diferença significativa nas condições antes da compactação e após a colheita, logo, notou-se diferença significativa após a compactação, com os menores valores de Pt nos tratamentos 3P e 5P, com 55,26% e 58,08% respectivamente.

A Ksat na safra 2020/2021, apresentou diferença significativa nas condições antes e após a compactação e após a colheita, com redução expressiva nos tratamentos 1P, 3P e 5P após a compactação em relação a condição antes da compactação, porém, após a colheita a Ksat recuperou-se, obtendo-se valores superiores em relação a condição após a compactação. Na safra 2021/2022, a Ksat antes e após a compactação apresentou diferença significativa, constatando-se maior redução após compactação nos tratamentos 3P e 5P. Logo, após a colheita, não houve diferença significativa, todavia, ocorreu aumento em relação a condição após a compactação (Tabela 4).

Assim sendo, na escala micromecânica, os solos são definidos como materiais viscoelásticos, pois exibem função de fluxo, incluindo a elasticidade do solo (HOK et al., 2021; SOBUCKI et al., 2022), cuja expansibilidade do solo, dá-se presumidamente a MOS (REICHERT et al., 2023), em Latossolos com predominância de argilominerais não expansivos (REICHERT et al., 2022).

Portanto, a expansibilidade do solo reflete na recuperação subsuperficial dos atributos físico-hídrico relacionados à estrutura do solo, aumentando a resiliência física do solo (CAMARGO; CÁSSARO; PIRES, 2022), mediante ciclos de umedecimento/secamento do solo, processo em que há movimento da massa de solo por contração e expansão, através da elasticidade condicionada pela MOS (REICHERT et al., 2018; OLIVEIRA; CÁSSARO; PIRES, 2021), assim como detectado nas áreas do NEEA e do IDR-Paraná.

3.3.2 Produtividade da soja

Na Figura 7 encontram-se os valores médios da produtividade da soja nas áreas do NEEA e do IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022 dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador.

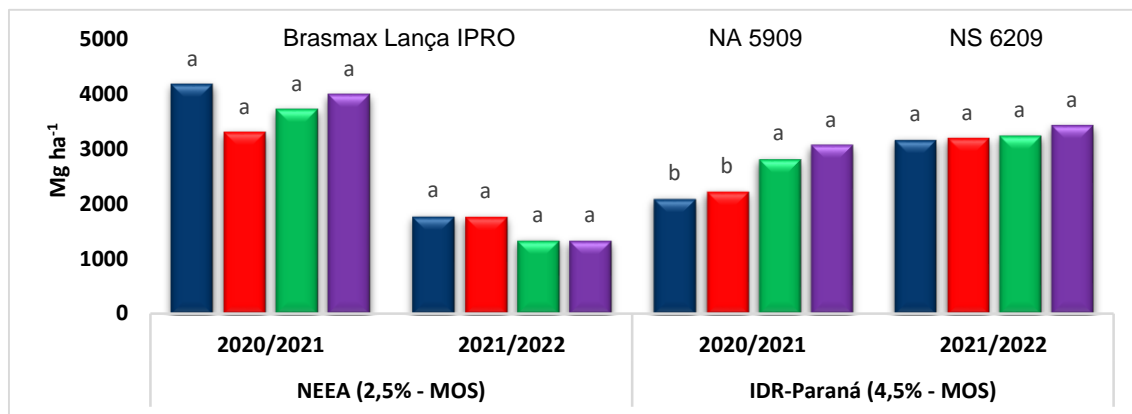


Figura 7. Produtividade da soja nas áreas do NEEA e do IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022. 0P: azul; 1P: vermelho; 3P: verde; 5P: roxo. Médias dos estados de compactação seguidas por letras distintas nas colunas diferem estatisticamente através do teste de Tukey ($p < 0,05$).

A produtividade da soja nas áreas do NEEA, nas safras 2020/2021 e 2021/2022, não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos (0P, 1P, 3P e 5P). Portanto, é evidente que a produtividade na safra 2021/2022 foi inferior em relação à safra 2020/2021, por consequência da estiagem severa que comprometeu o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da soja (Figura 3).

Entretanto, a produtividade da soja na área do IDR-Paraná na safra 2020/2021, foi significativamente menor nos tratamentos 0P e 1P, em comparação aos tratamentos 3P e 5P, devido a eventos de ataques de lebres durante o desenvolvimento da cultura. Na safra 2021/2022, não houve diferença significativa entre os tratamentos, mesmo com a ocorrência de períodos de estiagem durante o desenvolvimento da cultura.

Portanto, a não ocorrência de diferença significativa entre os tratamentos, presumivelmente esteja associada à alta resiliência do solo das áreas experimentais do IDR-Paraná devido ao alto teor de MOS, recuperando rapidamente a deformação sofrida na estrutura do solo pelos tratamentos impostos. Estes resultados corroboram com os dados encontrados por Borgmann et al. (2021), Barboza et al. (2021) e Mulazzani et al. (2022).

3.4 CONCLUSÕES

As áreas do NEEA e do IDR-Paraná apresentaram resiliência física, conforme o teor de MOS.

Os ciclos de umedecimento/secamento do solo contribuíram para a recuperação das deformações impostas pelos estados de compactação estabelecidos.

Os tratamentos não comprometeram a produtividade da soja, sobretudo nas áreas experimentais do IDR-Paraná com maior teor de MOS.

4. CAPÍTULO 2. RESILIÊNCIA DE LATOSSOLOS ARGILOSOS SOB ESTADOS DE COMPACTAÇÃO: RECUPERAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES SUPERFICIAIS

MESSA, Vinícius Rigueiro. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro - 2024. **Resiliência de Latossolos argilosos sob estados de compactação: recuperação das deformações superficiais**. Orientador: Dr. Deonir Secco. Coorientadores: Dra. Araceli Ciotti de Marins e Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior.

RESUMO

O objetivo deste trabalho visa avaliar a cada ciclo de umedecimento/secamento do solo a resiliência de dois Latossolos argilosos sob sistema plantio direto (SPD) com diferentes teores de matéria orgânica do solo (MOS) submetido a estados de compactação no solo (0, 1, 3 e 5 passadas de um trator). O experimento foi desenvolvido nas áreas experimentais do Núcleo Experimental de Engenharia Agrícola (NEEA), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, *campus* Cascavel - PR e nas áreas experimentais do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) - polo regional de Santa Tereza do Oeste - PR, em duas safras de cultivo da soja, 2020/2021 e 2021/2022. Em ambos os locais o solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), de textura argilosa a muito argilosa. As áreas do NEEA e do IDR-Paraná possuem teor médio de MOS respectivamente de 2,5% e 4,5%. Em ambas as áreas foram estabelecidos estados de compactação no solo através da passagem de um conjunto trator-pulverizador, (John Deere 7515) 600L carregado, com a umidade do solo próximo do limite de plasticidade, em que se obtém a máxima compactação do solo. Na superfície do solo através de um perfilômetro antes e após o estabelecimento dos estados de compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja foram avaliados os índices de rugosidade da superfície do solo (IR), o percentual residual da deformação do solo ($P_{\text{residual-DS}}$) e o percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{\text{recuperação-DS}}$). O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso. Utilizou-se o software Sisvar versão 5.6 para análise dos dados. Aplicou-se o teste Tukey ($p < 0,05$). O solo das áreas do IDR-Paraná obteve aproximadamente 1,0% de recuperação do IR a mais em relação as áreas do NEEA. O $P_{\text{residual-DS}}$ das áreas do IDR-Paraná foi de 58,33% e as áreas do NEEA de 59,27%. O $P_{\text{recuperação-DS}}$ das áreas do IDR-Paraná foi de 41,67%, enquanto nas áreas do NEEA foi de 40,73%, evidenciando maior capacidade regenerativa do solo das áreas do IDR-Paraná devido ao maior teor de MOS. Os ciclos de umedecimento/secamento do solo favoreceram a ação da expansão do solo devido a elasticidade condicionada pela MOS.

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

PALAVRAS-CHAVE: elasticidade do solo; tráfego de máquinas; compactação.

MESSA, Vinícius Rigueiro. Western Paraná State University, February - 2024.
Resilience of clayey Oxisols under states of compaction: recovery of surface deformations. Advisor: Dr. Deonir Secco. Co-advisors: Dra. Araceli Ciotti de Marins e Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior.

ABSTRACT

The objective of this work aims to evaluate, at each soil wetting/drying cycle, the resilience of two clayey Oxisols under no-tillage system (NTS) with different soil organic matter (SOM) contents subjected to states of soil compaction (0, 1, 3 and 5 passes of a tractor). The experiment was carried out in the experimental areas of the Experimental Center for Agricultural Engineering (NEEA), at the Western Paraná State University - UNIOESTE, *campus* Cascavel - PR and in the experimental area of the Institute of Rural Development of Paraná (IDR-Paraná) - regional pole of Santa Tereza do Oeste - PR, in two soybean growing seasons, 2020/2021 and 2021/2022. In both locations, the soil is classified as distroferric Red Latosol (LVdf), with a clayey to very clayey texture. The NEEA and IDR-Paraná areas have an average SOM content of 2.5% and 4.5% respectively. In both areas, states of soil compaction were established through the passage of a loaded tractor-sprayer set (John Deere 7515) 600L, with soil moisture close to the plasticity limit, in which maximum soil compaction is obtained. On the soil surface using a profilometer before and after the establishment of compaction states, after each soil wetting/drying cycle and after the soybean cultivation cycle, the soil surface roughness indices (IR) were evaluated, the residual percentage of soil deformation ($P_{\text{residual-DS}}$) and percentage of recovery of soil deformation ($P_{\text{recovery-DS}}$). The experimental design was entirely randomized. Sisvar software version 5.6 was used for data analysis. The Tukey test was applied ($p < 0.05$). The soil in the IDR-Paraná areas obtained approximately 1.0% more IR recovery compared to the NEEA areas. The $P_{\text{residual-DS}}$ of the IDR-Paraná areas was 58.33% and the NEEA areas was 59.27%. $P_{\text{recovery-DS}}$ in the IDR-Paraná areas was 41.67%, while in the NEEA areas it was 40.73%, showing greater soil regenerative capacity in the IDR-Paraná areas due to the higher SOM content. Soil wetting/drying cycles favored the action of soil expansion due to elasticity conditioned by SOM.

“This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001”

KEYWORDS: soil elasticity; machine traffic; compaction.

4.1 INTRODUÇÃO

O uso intensivo dos solos agrícolas sob sistema plantio direto (SPD), aliado ao tráfego indiscriminado sob condições de umidade do solo inadequadas, impactam a sua estrutura, causando compactação subsuperficial, provocando rearranjo na distribuição do tamanho e tortuosidade dos poros e das partículas do solo por unidade de volume (ALLOCCA et al., 2023; REICHERT et al., 2023).

Logo, a compactação é uma das principais causas de degradação física do solo, cada vez mais proeminente enfrentado pela agricultura moderna mundialmente, que pode levar a alterações na variabilidade tridimensional da estrutura do solo, envolvendo o aumento da densidade do solo (D_s) e redução do espaço poroso, por intermédio de forças coesivas (SIVASABARI; AJAYKUMAR, 2020; HUANG; HORN; REN, 2022; REICHERT et al., 2023).

Contudo, estas alterações estruturais modificam a funcionalidade do sistema de poros, o fluxo de ar e a deflexão mecânica do solo, ou seja, a resposta estrutural perante as aplicações de cargas, variável no tempo, visto que a estrutura do solo é dinâmica e sujeita a mudanças, em suas características morfológicas (HOLTHUSEN et al., 2020; GHANBARIAN; LIN; PIRES, 2023).

À vista disso, o recalque mais intenso do solo afeta o seu estado mecânico (HOLTHUSEN et al., 2019), resultando em menor estabilidade mecânica interna dos agregados (SOBUCKI et al., 2022). O aumento da D_s afeta os parâmetros reológicos do solo (BATISTÃO et al., 2020; HOLTHUSEN et al., 2020), fundamental para parametrizar e caracterizar quantitativamente as ligações interpartículas mecânicas das propriedades dos solos (JINXIAO et al., 2021), o caráter viscoelástico, e o seu comportamento microestrutural (HAAS; HORN, 2022), mediante alterações oriundas de esforços mecânicos, tensão-deformação transitórias do tráfego de máquinas (FU et al., 2019; HORN et al., 2019).

Entretanto, solos coesivos, com maiores teores de argila e aporte de carbono orgânico do solo (COS) e menor D_s são reologicamente mais estáveis, devido ao efeito coesivo da argila e dos óxidos de Fe e Al, bem como a ação agregadora e propriedades cimentantes da matéria orgânica do solo (MOS) (SUZUKI et al., 2022; HAAS; HORN, 2022).

A fim de melhorar e preservar a qualidade do solo, faz-se necessário, o controle do tráfego de máquinas, a intensificação de um sistema de lavoura de

conservação com fluxo contínuo de carbono através da biomassa permanente na superfície do solo ao longo do tempo, preceitos de um SPD de qualidade, pois são indicadores-chave do funcionamento do solo e consequentemente aumentam a sua resiliência física (HAAS; HORN, 2022; REICHERT et al., 2023).

No entanto, os ciclos sazonais naturais de umedecimento/secamento, podem alterar as propriedades mecânicas dos solos (GOWTHAMAN; NAKASHIMA; KAWASAKI, 2022) visto que a viscoelasticidade depende da D_s , do teor de MOS e umidade do solo, favorecendo a estabilização mecânica da estrutura em termos de resistência de partículas e agregados, processo hierárquico de formação estrutural do solo (REICHERT et al., 2023).

Vários autores atestam que o incremento do teor de MOS pode potencialmente ampliar a elasticidade, melhorando a resiliência do solo (HAAS; HORN, 2022; SOBUCKI et al., 2022; REICHERT et al., 2023). Porém, os efeitos integrados de estados de compactação em áreas com diferentes teores de MOS não foram detalhadamente estudados. Não foram encontrados na literatura trabalhos que relacionassem os fatores das tendências restaurativas estruturais em Latossolos argilosos.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cada ciclo de umedecimento/secamento do solo a resiliência de dois Latossolos argilosos sob SPD com diferentes teores de MOS submetido a estados de compactação no solo (0, 1, 3 e 5 passadas de um trator).

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização e descrição das áreas de estudo

As informações sobre a localização e a descrição das áreas de estudo estão apresentadas no item 3.2.1 do Capítulo 1.

4.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

As informações sobre o delineamento experimental e tratamentos estão apresentadas no item 3.2.2 do Capítulo 1.

4.2.3 Precipitação, temperatura mínima e máxima e umidade relativa média próximas as leituras do perfilômetro

Na Figura 8 encontram-se os dados pluviométricos, temperatura mínima e máxima e umidade relativa média próximas as leituras do perfilômetro das áreas do NEEA e IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022.

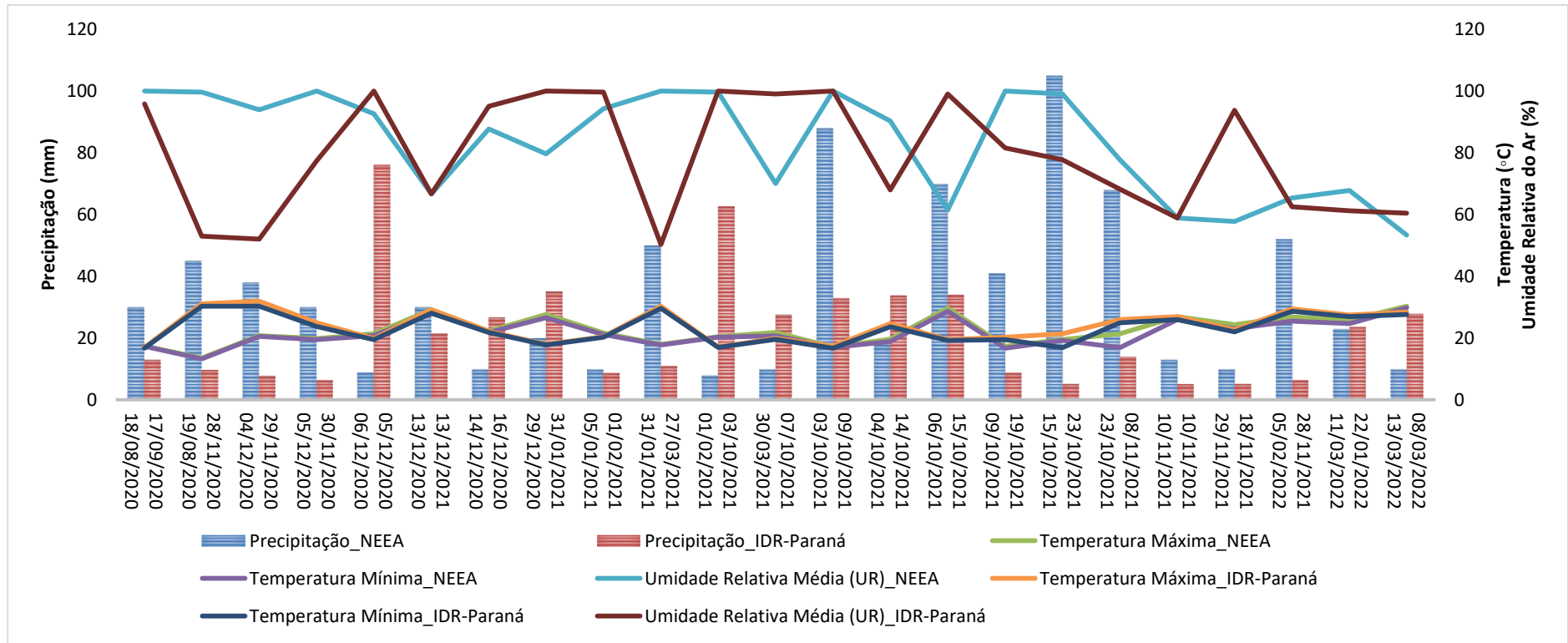


Figura 8. Informações climáticas do NEEA e IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022.

4.2.4 Determinação da recuperação superficial do solo

Na superfície do solo foram realizadas avaliações através de um perfilômetro. Na faixa de monitoramento (FM) encontram-se as áreas de leituras do perfilômetro em cada repetição nos tratamentos.

As leituras do perfilômetro ocorreram antes e após o estabelecimento dos estados de compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja. Calculou-se os índices de rugosidade da superfície do solo (IR). Os IR foram expressos em forma logarítmica, corroborando na avaliação da resiliência física dos solos, mediante a variação no IR. Por intermédio destes dados, calculou-se o percentual residual da deformação do solo ($P_{\text{residual-DS}}$) e o percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{\text{recuperação-DS}}$) de ambas as áreas expresso em percentagem.

O $P_{\text{residual-DS}}$ é uma relação entre a deformação restante após o ciclo de cultivo da soja e a deformação total do solo após a compactação. O $P_{\text{recuperação-DS}}$ é o contrário do $P_{\text{residual-DS}}$ e caracteriza o quanto a elasticidade do solo restituiu da deformação total após o ciclo de cultivo da soja.

O perfilômetro é composto de um painel de 1,2 m de largura, com 21 varetas de alumínio espaçadas a cada 0,05 m. Este painel, através de avanços definidos a cada 0,1 m, percorre uma distância de 1,0 m de comprimento, totalizando 210 pontos, sendo consideradas suficientes na determinação do microrelevo de acordo com Allmaras et al. (1966) (Figura 9).

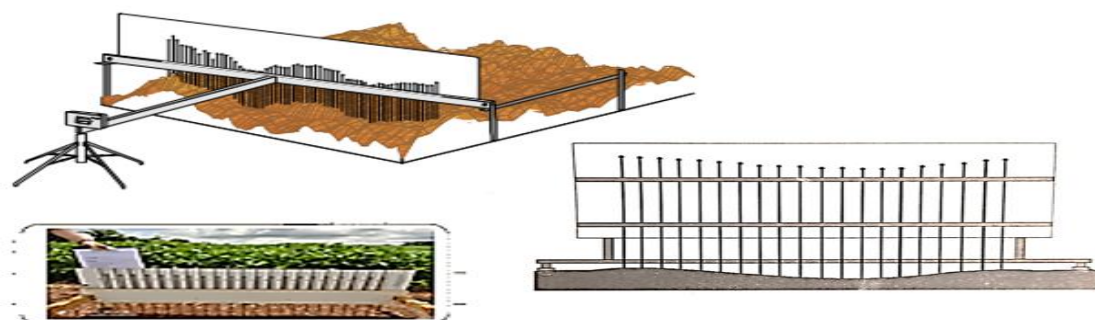


Figura 9. Perfilômetro para determinação do microrelevo do solo. Fonte: Modificado de Vidal Vázquez et al. (2010) e Klein (2014).

Tendo em vista que foram 5 repetições para cada tratamento, foram obtidas a variação da rugosidade em 1050 pontos (5 repetições x 210 pontos/repetição). Os registros de leituras foram realizados através de

fotografias digitais. Para posicionamento e nivelamento do perfilômetro, foram enterrados blocos de concreto a 0,5 m nos intervalos ao lado da FM como nível de referência (Figura 10), devido à impossibilidade em se manter sempre as mesmas estacas de referência nos locais de leitura. A partir destes blocos de concreto, foi medido 0,7 m a partir da base dos blocos de concreto e estendido um fio de nylon acima do nível do solo.

O IR foi determinado pelas medidas de elevação das varetas de alumínio colocadas sobre o solo através do perfilômetro.

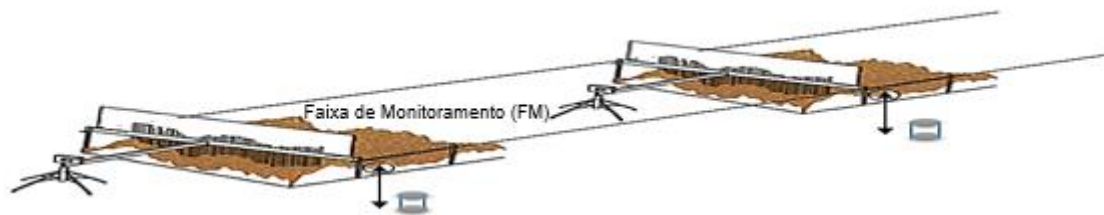


Figura 10. Posicionamento e nivelamento do perfilômetro e alocação de blocos de concreto a 0,50 m de profundidade nos intervalos ao lado da FM como nível de referência Fonte: Modificado de Vidal Vázquez et al. (2010).

O índice de rugosidade superficial (IR) foi obtido de acordo com a metodologia de Planchon; Darboux (2002), conforme a Equação 2:

$$IR = \bar{H} * \sqrt{\frac{\sum (\ln H_{ij} - \overline{\ln H_i} - \overline{\ln H_j} + \overline{\ln H})^2}{N - 1}}$$

Em que: IR: índice de rugosidade superficial; H: médias das leituras; \sum : somatório; $(\ln H_{ij})$: logarítmico das alturas na linha e na coluna; $(\overline{\ln H_i})$: média do logarítmico das alturas na linha; $(\overline{\ln H_j})$: média do logarítmico das alturas na coluna; $(\overline{\ln H})$: média do logarítmico da altura geral; N: número de pontos.

4.2.5 Leituras perfilômetro das áreas experimentais (NEEA e IDR-Paraná) nas duas safras (2020/2021 e 2021/2022)

Na Tabela 5 encontram-se as datas das leituras do perfilômetro nas áreas experimentais do NEEA e IDR-Paraná, nas safras 2020/2021 e 2021/2022. Foram realizadas seis leituras em cada área experimental, em ambas as safras.

Tabela 5. Leituras perfilômetro nas áreas do NEEA e IDR-Paraná nas safras 2020/2021 e 2021/2022

Leituras perfilômetro - NEEA Safra 2020/2021		Leituras perfilômetro - IDR-Paraná Safra 2020/2021	
Data	Área experimental	Data	Área experimental
03/09/2020	Antes da compactação	21/09/2020	Antes da compactação
07/12/2020	Estabelecimento dos tratamentos	02/12/2020	Estabelecimento dos tratamentos
15/12/2020		08/12/2020	
11/01/2021	Após os tratamentos	17/12/2020	Após os tratamentos
11/02/2021		03/02/2021	
05/04/2021	Leitura final	06/04/2021	Leitura final
Leituras perfilômetro - NEEA Safra 2021/2022		Leituras perfilômetro - IDR-Paraná Safra 2021/2022	
Data	Área experimental	Data	Área experimental
06/10/2021	Antes da compactação	05/10/2021	Antes da compactação
08/10/2021	Estabelecimento dos tratamentos	05/10/2021	Estabelecimento dos tratamentos
19/10/2021		19/10/2021	
12/11/2021	Após os tratamentos	12/11/2021	Após os tratamentos
07/02/2022		24/01/2022	
14/03/2022	Leitura final	10/03/2022	Leitura final

4.2.6 Análise estatística

Para a análise dos dados, recorreu-se ao software Sisvar versão 5.6. Os dados de recuperação superficial do solo foram analisados aplicando-se o teste Tukey ($p < 0,05$).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Recuperação superficial do solo

Na Figura 11 encontram-se os valores médios do IR dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e IDR-Paraná (c e d).

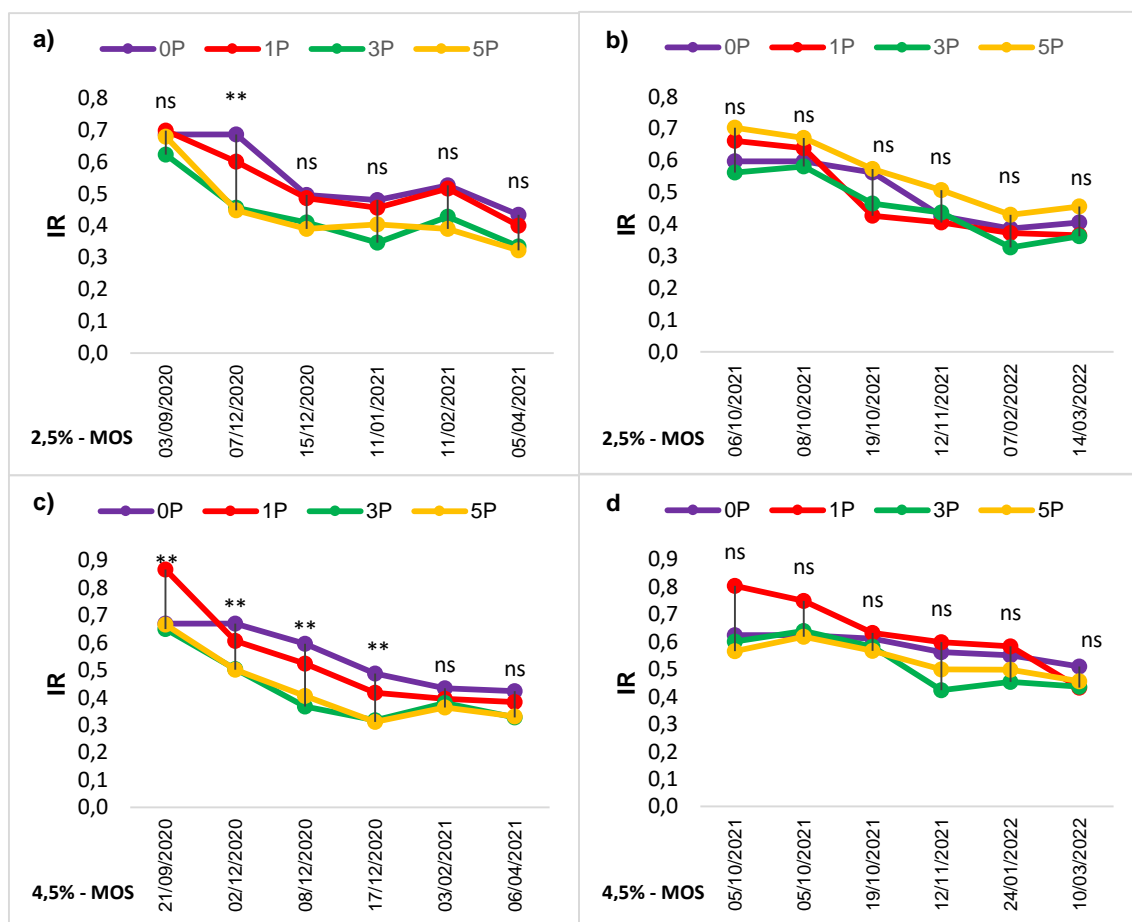


Figura 11. Valores médios do IR dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador, nas condições antes e após a compactação, após cada ciclo de umedecimento/secamento do solo e após o ciclo de cultivo da soja (valores médios de 5 repetições) nas áreas experimentais do NEEA (a e b) e do IDR-Paraná (c e d). Safras 2020/2021 e 2021/2022 respectivamente. Médias de tratamentos seguidas de “ns” não houve diferença significativa. Médias de tratamentos seguidas de “**” houve diferença significativa e as letras maiúsculas representam a diferença significativa entre a condição antes da compactação e a última leitura pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nas áreas do NEEA (Figuras 11a e 11b), verifica-se que os valores médios do IR dos quatro tratamentos (0, 1, 3 e 5 passadas de um trator) na condição antes da compactação, nas safras 2020/2021 e 2021/2022, foram respectivamente de 0,671 e 0,631. Os valores médios do IR dos tratamentos na condição após o ciclo de cultivo da soja, foram de 0,373 e 0,397 respectivamente, havendo diferenças significativas entre as condições antes da compactação e após o ciclo de cultivo da soja.

Nas áreas do IDR-Paraná (Figuras 11c e 11d), também ocorreu diferença significativa entre os valores médios do IR, entre as condições antes da compactação e após o ciclo de cultivo da soja, nas safras 2020/2021 e 2021/2022. As diferenças entre os valores do IR, a exemplo das áreas do NEEA, foram respectivamente de 0,713 e 0,671 para 0,362 e 0,434 nas respectivas safras.

A redução média do IR nas áreas do NEEA nas safras 2020/2021 e 2021/2022 foram de 0,298 e 0,234 respectivamente. Nas áreas do IDR-Paraná a redução média do IR, foram respectivamente de 0,351 e 0,237 nas safras 2020/2021 e 2021/2022 (Figuras 11c e 11d).

Na Figura 12, encontram-se os valores médios do percentual residual da deformação do solo ($P_{\text{residual-DS}}$) e do percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{\text{recuperação-DS}}$) das áreas do NEEA e do IDR-Paraná.

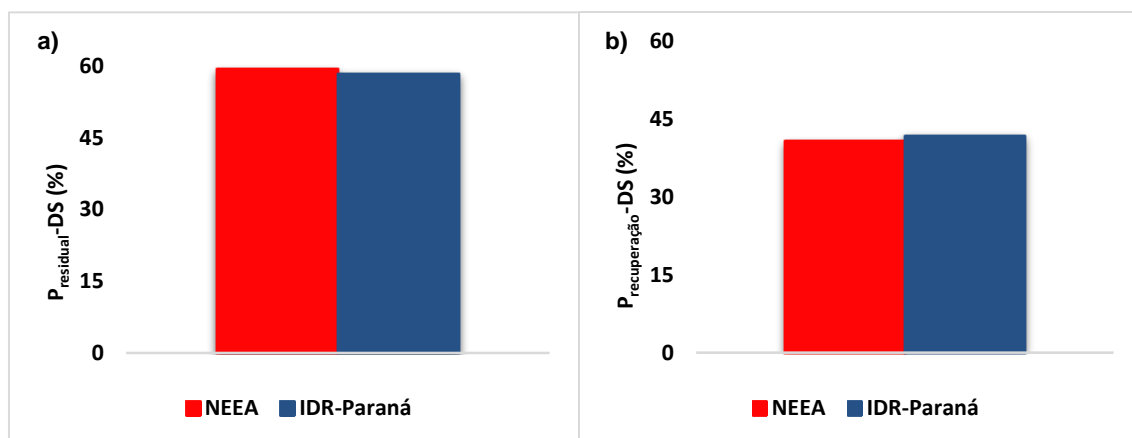


Figura 12. Valores médios do percentual residual da deformação do solo ($P_{\text{residual-DS}}$) e do percentual de recuperação da deformação do solo ($P_{\text{recuperação-DS}}$), dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador das áreas do NEEA e do IDR-Paraná.

O $P_{\text{residual-DS}}$ médio dos tratamentos com 0, 1, 3 e 5 passadas do conjunto trator-pulverizador nas áreas do NEEA foi de 59,27% enquanto que nas áreas do IDR-Paraná foi de 58,33% (Figura 12a). Isso evidencia a maior capacidade de recuperação da deformação do solo das áreas do IDR-Paraná em relação ao solo das áreas do NEEA. Além disto, o $P_{\text{recuperação-DS}}$ nas áreas do NEEA foi de 40,73%, enquanto nas áreas do IDR-Paraná foi de 41,67% (Figura 12b), aumento de aproximadamente 1,0%, evidenciando maior capacidade regenerativa do solo devido ao maior teor de MOS.

Após a análise dos dados do IR (Figura 11), $P_{\text{residual-DS}}$ (Figura 12a) e $P_{\text{recuperação-DS}}$ (Figura 12b), observa-se que os dados demonstraram maior capacidade regenerativa das áreas do IDR-Paraná em relação às áreas do NEEA, evidenciando a maior elasticidade do solo pelo maior teor de MOS nas áreas do IDR-Paraná.

Todavia, os dados refletem o manejo do solo do passado como parte da memória do solo, representando o estado estrutural atual do solo sob os efeitos das pressões e perturbações passadas, bem como fornecendo possíveis recomendações para melhoria futura do manejo holístico do solo, avaliando o potencial adaptativo intrínseco dos solos (XIAO et al., 2022; ZHANG et al., 2023).

Desta forma, os potenciais de expansão e contração, são importantes para a estimativa da resiliência física, como metafunção do solo, e um bioindicador fundamental para parametrizar o caráter viscoelástico e caracterizar a estabilidade microestrutural do solo, assim como visto em pesquisa e por Haas; Holthusen; Horn (2022) e Reichert et al. (2023), pois determina a capacidade de um sistema retornar ao estado de equilíbrio após uma perturbação e manter a eficiência de função em um sistema multifuncional como o solo.

Este potencial é um produto do manejo do solo do passado e do presente e, ao mesmo tempo, uma perspectiva de possíveis respostas do solo a distúrbios futuros. Entretanto, a resiliência não é um parâmetro único, mas provavelmente uma metafunção holística de um solo ou de um todo, derivado de todas as suas propriedades únicas, em interação com os processos contínuos (SMITH et al., 2022; DEVINE; DAHLKE; O`GEEN, 2022; CHAO; SHI; FOWMES, 2023).

Logo, aportar MOS, a fim de melhorar a estrutura do solo, reduz os riscos de degradação do solo, além de ser essencial para colocar em movimento as

tendências restaurativas do solo (DEVINE; DAHLKE; O`GEEN, 2022; CHAO; SHI; FOWMES, 2023; REICHERT et al., 2023).

Portanto, os resultados obtidos em pesquisa, em relação a recuperação dos estados de compactação, amparam a comunidade científica e produtores rurais, como uma ferramenta de suporte técnico, a fim de demonstrar que o aumento no aporte de MOS é essencial para a resiliência física do solo.

4.4 CONCLUSÕES

O solo das áreas do IDR-Paraná obteve aproximadamente 1,0% de recuperação do IR a mais em relação as áreas do NEEA.

O $P_{\text{residual-DS}}$ das áreas do IDR-Paraná foi de 58,33% e as áreas do NEEA de 59,27%. O $P_{\text{recuperação-DS}}$ das áreas do IDR-Paraná foi de 41,67%, enquanto nas áreas do NEEA foi de 40,73%, evidenciando maior capacidade regenerativa do solo das áreas do IDR-Paraná devido ao maior teor de MOS.

Os ciclos de umedecimento/secamento do solo favoreceram a ação da expansão do solo devido a elasticidade condicionada pela MOS.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVEN, S., MENASSERI, S., CHENU, C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 41, n. 1, p. 1-12, 2009.

ADDISCOTT, T. M. Entropy and sustainability. **European Journal of Soil Science**, Dordrechster, v. 46, n. 2, p. 161-168, 1995.

ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; REIS JÚNIOR, F. B. Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos do Planeta, 14. ed. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, Brasília, 2004. 25 p.

AJAYI, A. E.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; GONTIJO, I.; ARAUJO JUNIOR, C. F.; VASCONCELOS JUNIOR, A. I. Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 14-18, 2009.

ALLMARAS, R. R.; BURWELL, R. E.; LARSON, W. E.; HOLT, R. F.; NELSON, W. W. **Total porosity and randon roughness of the interrow zone as influenced by tillage**. Washington: USDA, 1966. 22 p. (Conservation Research Report, 7).

ALLOCCA, C.; CASTRIGNANÒ, A.; NASTA, P.; ROMANO, N. Regional-scale assessment of soil functions and resilience indicators: Accounting for change of support to estimate primary soil properties and their uncertainty. **Geoderma**, Amsterdam, v. 431, n. 116339, p. 1-13, 2023.

ALTIERI, M. A.; KOOHAFKAN, P; NICHOLLS, C. I. Strengthening resilience of modern farming systems: a key prerequisite for sustainable agricultural production in an era of climate change. **Third World Network Brief Paper**, v. 1, n. 70, p. 1-8, 2014.

AMBUS, J. V.; AWE, G. O.; CARVALHO, P. C. F.; REICHERT, J. M. Integrated crop-livestock systems in lowlands with rice cultivation improve root environment and maintain soil structure and functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 227, n. 105592, 2023.

ARCOVERDE, S.N.S.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L. et al. Soybean agronomic performance and soil physical attributes under tractor traffic intensities. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 1, p. 113-120, 2020.

BARBOZA, F. S.; STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; LIMA, C. L. R.; PINTO, L. F. S.; JARDIM, T. M.; PIMENTEL, J. P.; ALBERT, R. P.; VIVAN, G. A. Impact of machine traffic events on the physical quality of a minesoil after topographic reconstruction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 210, n. 104981, 2021.

BARETA JUNIOR, E.; SILVA, A. A. P.; ZANARDINI, T. M.; SENS, G.; COLECHA, K.; RAMPIM, L.; POTT, C. A. Soil physical properties in variable levels of soil

compaction. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 1-8, 2021.

BATISTÃO, A. C.; HOLTHUSEN, D.; REICHERT, J. M.; SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C. Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 363, n. 114130, 2020.

BÁŤKOVÁ, K.; MATULA, S.; MIHÁLIKOVÁ, M.; HRÚZOVÁ, E.; ABEBRESE, D. K.; KARA, R. S.; ALMAZ, C. Prediction of saturated hydraulic conductivity K_s of agricultural soil using pedotransfer functions. **Soil and Water Research**, v. 18, n. 1, p. 25-32, 2023.

BAUMGARTEN, W.; DÖRNER, J.; HORN, R. Microstructural development in volcanic ash soils from South Chile. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 129, n. 1, p. 48-60, 2013.

BAVOSO, M. A.; SILVA, A. P. DA; FIGUEIREDO, G. C.; TORMENA, C. A.; GIAROLA, N. F. B. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1892-1904, 2012.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, Amsterdam, v. 62, n. 1, p. 59-68, 2011.

BERGAMIM, A. C. Compactação do solo em sistemas intensivos de produção. Piracicaba: **International Plant Nutrition Institute**, 2018.

BERISSO, F. E.; SCHOJONNING, P.; LAMANDÉ, M.; WEISSKOPF, P.; STETTLER, M.; KELLER, T. Effects of the stress field induced by a running tyre on the soil pore system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 131, n. 1, p. 36-46, 2013.

BERTOL, I.; AMARAL, A. J.; VIDAL VÁZQUEZ, E.; PAZ GONZÁLEZ, A.; BARBOSA, F. T.; BRIGNONI, L.F. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 543-553, 2006.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. Mapa de solos do Estado do Paraná. Legenda atualizada. Rio de Janeiro, **Embrapa Florestas/Embrapa Solos/Instituto Agrônomo do Paraná**, 2008.

BIRIS, S. S.; UNGUREANU, N.; MAICAN, E.; MURAD, E.; VLADUT, V. FEM model to study the influence of tire pressure on agricultural tractor wheel deformations. **Engineering for Rural Development**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p. 223-228, 2011.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Soil Resilience and Conservation. In: Principles of Soil Conservation and Management. **Springer-Dordrecht: Nature Research editors**. Amsterdam, v. 1, n.1, p. 425-447, 2010.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L. R.; SCHLEGEL, A. J.; LYON, D. J.; VIGIL, M. F.; MIKHA, M. M.; STAHLMAN, P. W.; RICE, C. W. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, n. 6, p. 1871-1879, 2009.

BLUM, J. et al. Assessment of soil physical attributes at sowing row and inter-row under no-till system. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5, p. 888-895, 2014.

BORGMANN, C.; SECCO, D.; MARINS, A. C.; ZANÃO JÚNIOR, L. A.; BASSEGIO, D.; SOUZA, S. N. M.; ZANG, F. N.; SILVA, T. R. B. Effect of Soil Compaction and Application of Lime and Gypsum on Soil Properties and Yield of Soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 52, n. 12, p. 1434-1447, 2021.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 438-441, 1982.

BRADY, N.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716 p.

BRAIDA, J. A.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M. Matéria orgânica e seu efeito na física no solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 7, n. 1, p. 221-278, 2011.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; DALVAN, J.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 131-139, 2010.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 477-485, 2008.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BRÜGGEMANN, G. Estado da arte e divulgação do plantio direto no Brasil. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 20, n. 122, p. 16-23, 2011.

BUDHATHOKI, S.; LAMBA, J.; SRIVASTAVA, P.; WILLIAMS, C.; ARRIAGA, F.; KARTHIKEYAN, K. G. Impact of land use and tillage practice on soil macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Catena**, Amsterdam, v. 210, n. 105886, 2022.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality - A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 105-125, 2018.

BURROUGHS, C. H., MONTES, C. M., MOLLER, C. A., MITCHELL, N. G., MICHAEL, A. M., PENG, B., KIMM, H., PEDERSON, T. L., LIPKA, A. E., BERNACCHI, C. J., GUAN, K., AINSWORTH, E. A. Reductions in leaf area index, pod production, seed size, and harvest index drive yield loss to high temperatures in soybean. **Journal of Experimental Botany**, v. 74, n. 5, p. 1629-1641, 2023.

BUSCHBACHER, R. A teoria da resiliência e os sistemas socioecológicos: como se preparar para um futuro imprevisível?. **IPEA - Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, v. 1, n. 9, p. 11-24, 2014.

CABELL, J. F.; OELOFSE, M. An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. **Ecology and Society**, v. 17, n. 1, p. 18, 2012.

CAMARGO, A. O.; SANTOS, G. A.; GUERRA, J. G. M. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: Santos, G.A. & Camargo, F.A.O. (Eds). Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, **Ed. Gênese**.1999, 491 p.

CAMARGO, M. A.; CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F. How do geometric factors influence soil water retention? A study using computerized microtomography. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, Amsterdam, v. 81, n. 137, 2022.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CAPOBIANGO, N. P., BESSA, G. B.; PERIS, G. C. O., SILVA, F. L., DIAS, D. C. F. S., FERNANDES, R. B. A., SILVA, M. F., SILVA, L. J. Evaluation of soybean genotypes grown under soil compaction. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 209, n. 4, p. 517-531, 2023.

CARTER, M.R. Characterizing of soil physical condition in reduced tillage systems for winter wheat on a fine sandy loam using small cores. **Canadian Journal of Soil Science**, Canadá, v. 72, n. 4, p. 395-402, 1992.

CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V.; MARCOLINO, F. C.; TORMENA, C. A.; KELLER, T.; MORAES, A. Soil Structural Quality and Relationships With Root Properties in Single and Integrated Farming Systems. **Frontiers in Plant Science**, Amsterdam, v. 10, n. 901302, p. 1-10, 2022.

ÇELİK, İ.; GUNAL, H.; ACAR, M.; ACIR, N.; BERKET, B. Z.; BUDAK, M. Evaluating the long-term effects of tillage systems on soil structural quality using visual assessment and classical methods. **Soil Use and Management**, Amsterdam, v. 36, n. 1, p. 223-239, 2020.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; MAIA, S. M. F.; CERRI, C. E. P.; COSTA JÚNIOR, C.; FEIGL, B. J.; FRAZÃO, L. A.; MELLO, F. F. C.; GALDOS, M. V.; MOREIRA, C. S.; CARVALHO, J. L. N. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 67, n. 1, p.102-116, 2010.

CHAO, Z.; SHI, D.; FOWMES, G. J. Mechanical behaviour of soil under drying-wetting cycles and vertical confining pressures. **Environmental Geotechnics**, Amsterdam, p. 1-11, 2023.

CHRISTENSEN, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Science**, Amsterdam, v. 20, n.1, p. 1-90, 1992.

COLETI, J. T.; DEMATTÊ, J. L. I. Compactação artificial em solos experiência e dados informativos. **Álcool e Açúcar**, São Paulo, v. 2, n. 6, p. 34-39, 1982.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Boletim de Safra de Grãos**. 6º Levantamento - Safra 2023/2024, v. 11, n. 6, p. 1-125, 2024.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. **Nature**, Amsterdam, v. 440, n. 1, p. 165-173, 2006.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; MAZURANA, M. Capacidade de suporte e compressibilidade de um Argissolo, influenciadas pelo tráfego e por plantas de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 2629-2637, 2008.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N.D.; WIETHÖLTER, S. Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista, Brasília, 2012. (**Documento online número 141**).

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Amsterdam, v. 3, n. 1, p. 1-25, 2010.

DEVINE, S. M.; DAHLKE, H. E.; O'GEEN, A. T. Mapping time-to-trafficability for California agricultural soils after dormant season deep wetting. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 218, n. 105316, p. 1-12, 2022.

DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. N.; ANDRADE, S. C.; AZEVEDO, M. B. Avaliação da sustentabilidade da estrutura de Argissolos em sistemas florestais. **Cerne**, Lavras, MG, v. 8, n. 1, p. 103- 114, 2002.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 175-192, 1996.

DORAN, J. W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26. Rio de Janeiro, 1997. **Anais**. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

DÖRNER, J.; DEC, D.; PENG, X.; HORN, R. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros de un andisol (typic hapludand) del sur de Chile. **Revista Ciência Suelo Nutricion Vegetal**, Temuco, Chile, v. 9, n. 3, p. 190-209, 2009.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G.; BRANDON, T. L. Soil strength and slope stability. **John Wiley & Sons**, Nova Jersey, 2014.

ELAOD, A.; CHEHAIBI, S.; ABROUGUI, K. Effect of the Passage for Different Tractors on the Soil Compaction. **International Journal of Current Engineering and Technology**, v. 5, n. 1, p. 527-533, 2015.

ELLIES, A.; GREZ, R.; RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnostico de la estructura del suelo. **Agro Sur**, Chile, v. 25, n. 1, p. 51-56, 1997.

ELTZ, F. L. F.; NORTON, L.D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity, tillage, and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 6, p. 1746-1755, 1997.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Brasília: Embrapa, p. 353, 2018.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979.

FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Soja. In: MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. **Brasília: INMET**, 2009. cap. 15, p. 261-278.

FERREIRA, C. J. B., SILVA, A. G., TORMENA, C. A., SEVERIANO, E. C., TAVARES, R. L. M., BRAZ, G. B. P., FILHO, S. V. P. Physiological and agronomic response of soybean cultivars to soil compaction in the Brazilian Cerrado. **Bragantia**, v. 82, n. e20220160, p. 1-15, 2023.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. Global carbon budget 2019. **Earth System Science Data**, Amsterdam, v. 11, n. 4, p. 1783-1838, 2019.

FRITTON, D. D. Evaluation of pedotransfer and measurement approaches to avoid soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 2, p. 268-278, 2008.

FU, Y.; TIAN, Z.; AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J. Measuring dynamic changes of soil porosity during compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 193, p. 114-121, 2019.

FUENTES-LLANILLO, R.; TELLES, T. S.; JUNIOR, D. S.; MELO, T. R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A. Expansion of no-tillage practice in conservation agriculture in Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 208, n. 104877, 2021.

GHANBARIAN, B.; LIN, Q.; PIRES, L. F. Scale dependence of tortuosity in soils

under contrasting cultivation conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 233, n. 105788, 2023.

GOWTHAMAN, S.; NAKASHIMA, K.; KAWASAKI, S. Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio cemented soil of expressway slope. **International Journal of Environmental Science and Technology**, Amsterdam, v. 19, p. 2309-2322, 2022.

GUPTA, S. C.; ALLMARAS, R. R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Soil Science**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 65-100, 1987.

GURGEL, A. L. C.; SANTANA, J. C. S.; THEODORO, G. F.; DIFANTE, G. S.; ALMEIDA, E. M.; ARCANJO, A. H. M.; COSTA, C. M.; COSTA, A. B. G.; FERNANDES, P. B. Compactação do solo: Efeitos na nutrição mineral e produtividade de plantas forrageiras. **Revista Científica Rural**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 13-29, 2020.

HAAS, C.; HOLTHUSEN, D.; HORN, R. The Rheological-Data Extraction Application: A time-saving tool for the extraction of measured rheological data from a specific rheometer-inherent software. **SoftwareX**, Amsterdam, v. 18, n. 101055, p. 1-3, 2022.

HAAS, C.; HORN, R. **Viscoelasticity and shear resistance of structured and H₂O₂-treated Mollisols**, 2022.

HARTGE, K.H.; HORN, R. Einführung in die Bodenphysik. **Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag**, 1999. 304p.

HAYES, M. H. B.; CLAPP, C. E. Humic substances: considerations of compositions, aspects of structures and environmental influences. **Soil Science**, São Paulo, v. 166, n. 2, p. 723-737, 2001.

HILLEL, D. Soil dynamics: Stress, strain and strength. In: HILLEL, D., ed. Environmental soil physics. New York, **Academic Press**, 1998. p.341-382.

HOBBS, P. R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Amsterdam, v. 363, n. 1491, p. 543-555, 2008.

HOK, L.; SÁ, J. C. M.; BOULAKIA, S.; REYES, M.; FERREIRA, A. O.; TIVET, F. E.; SAAB, S.; AUCCAISE, R.; INAGAKI, T. M.; SCHIMIGUEL, R.; FERREIRA, L. A.; BRIEDIS, C.; CANALLI, L. B. S.; KONG, R.; LENG, V. Dynamics of soil aggregate-associated organic carbon based on diversity and high biomass-C input under conservation agriculture in a savanna ecosystem in Cambodia. **Catena**, Amsterdam, v. 198, n. 105065, 2021.

HOLTHUSEN, D.; BATISTÃO, A. C.; REICHERT, J. M. Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micromechanics: brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content. **Rheologica Acta**, Amsterdam, v. 59, p. 545-563, 2020.

HOLTHUSEN, D.; PÉRTILE, P.; AWE, G. O.; REICHERT, J. M. Soil density and oscillation frequency effects on viscoelasticity and shear resistance of subtropical Oxisols with varying clay content. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 203, n. 104677, 2020.

HOLTHUSEN, D.; PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M.; HORN, R. Viscoelasticity and shear resistance at the microscale of naturally structured and homogenized subtropical soils under undefined and defined normal stress conditions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 191, p. 282-293, 2019.

HORN, R. et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.35, n. 1-2, p.23-36, 1995.

HORN, R. Stress–strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1, p. 77-88, 2003.

HORN, R.; BAUMGARTL, T.; KÜHNER, S.; LEBERT, M.; KAYSER, R. Zur Bedeutung des Aggregierungsgrades für die Spannungsverteilung in strukturierten Böden. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 154, n. 1, p. 21-26, 1991.

HORN, R.; HOLTHUSEN, D.; DÖRNER, J.; MORDHORST, A.; FLEIGE, H. Scale-dependent soil strengthening processes – What do we need to know and where to head for a sustainable environment? **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, n. 104388, 2019.

HUANG, X.; HORN, R.; REN, T. Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 406, n. 115452, 2022.

HUNGRIA, M. et al. Importância do sistema de semeadura na população microbiana do solo. **Comunicado Técnico/Embrapa-Soja**, Londrina, Paraná, n. 56, p. 1-9, 1997.

IAMAGUTI, J. L.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; JUNIOR, N. S. Soil tillage and emission of CO₂, soil temperature and soil moisture in a sugarcane area. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 497-504, 2015.

JAKOBSEN, B. F.; GREACEN, E. L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 5, n. 1, p. 55-70, 1985.

JIMENEZ, K. J.; ROLIM, M. M.; GOMES, I. F.; LIMA, R. P.; BERRÍO, L. L. A.; ORTIZ, P. F. S. Numerical analysis applied to the study of soil stress and compaction due to mechanised sugarcane harvest. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 206, n. 104847, 2021.

JIN, H.; HONGWEN, L.; RABI G. RASAILY, R. G.; QINGJIE, W.; GUOHUA, C.; YANBO, S.; XIAODONG, Q. & LIJIN, L. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat–maize cropping system in North China Plain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 113, n. 1, p. 48-54, 2011.

JINXIAO, W.; FEINAN, H.; CHENYANG, X.; SHIWEI, Z.; JINGFANG, L.; KUN, T.; SONGSONG, S. Effects of soil bulk density and water content on the mechanical stability of soil structure using rheological method. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, Amsterdam, v. 37, n. 19, p. 147-155, 2021.

JUMRANI, K., BHATIA, V. S., KATARIA, S., LANDI, M. Screening Soybean Genotypes for High-Temperature Tolerance by Maximin-Minimax Method Based on Yield Potential and Loss. **Agronomy**, v. 12, n. 11, p. 1-17, 2022.

JURY, W. A., HORTON, R. **Soil Physics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

JURY, W. A.; STOLZY, L. H. Soil physics. **Edição: CRC Press**. [S.l.: s.n.], p. 131-158, 2018.

KAISER, K.; GUGGENBERGER, G. Mineral Surfaces and Soil Organic Matter. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v. 54, n. 2, p. 219-236, 2003.

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society American Journal**, Amsterdam, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KASSAM, A.; FRIEDRICH, T.; DERPSCH, R.; KIENZLE, J. Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. **Field Actions Science Reports**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2015.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, n. 104293, 2019.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, Minas Gerais, v. 5, n. 1, p. 17-24, 1997.

KHAIDAPOVA, D. D.; CHESTNOVA, V. V. Effect of water on the phenological properties of typical chernozem in Kursk oblast. **Moscow University Soil Science Bulletin**, Amsterdam, v. 72, n. 5, p. 215-220, 2017.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262p.

KIRNAK, H.; GOKALP, Z.; DOGAN, E.; ÇOPUR, O. Soil characteristics of soybean fields as effected by compaction, irrigation and fertilization. **Legume Research**, Karnal, v.40, n.4, p.691-697, 2017.

KLEIN, V. A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um latossolo vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: UPF, 263p., 2014.

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

KOGER, J. L.; BURT, E. C.; TROUSE, A. C. Multiple pass effects of skidder tires on soil compaction in soil bins. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 1, p. 11-16, 1985.

KOOL, D.; TONG, B.; TIAN, Z.; HEITMAN, J. L.; SAUER, T. J.; HORTON, R. Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 193, p. 95-100, 2019.

KREISELMEIER, J.; CHANDRASEKHAR, P.; WENINGER, T.; SCHWEN, A.; JULICH, S.; FEGER, K-H.; SCHWARZEL, K. Temporal variations of the hydraulic conductivity characteristic under conventional and conservation tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 362, n. 114127, 2020.

KRETSCHMER, H. Koernung und Konsistenz. In: BLUME, H.-P.; FELIX-HENNINGSSEN, P.; FISCHER, W. R.; FREDE, H. G.; HORN, R.; STAHR, K. (Eds.). **Handbuch der Bodenkunde**, v. 1, Ecomed, 1st ed., Chapter 2.6.1.1, 1996.

KRZIC, M.; BUHNER, C. E.; TESTE, F.; DOMPTER, L.; RAHMAN, S. Soil properties influencing compactability of forest soils in British Columbia. **Canadian Journal of Soil Science**, Canadá, v. 84, p. 219-226, 2004.

KUHN, V. O.; LOPES, B. C. F. L.; CAICEDO, B.; CORDÃO-NETO, M. P. Mechanical behaviour of bimodal kaolin clay with aggregates. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 297, n. 106490, 2022.

KUIPERS, H. A relief meter of soil cultivation studies. Neth. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 5, n. 4, p. 255-262, 1957.

LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, n. 2-3, p. 275-286, 1991.

LEE, D. R.; KIM, K. U. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. **Journal of Terramechanics**, Great Britain, v. 34, n. 3, p. 187-208, 1997.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. In: VAN LIER, Q. de J. Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. p. 103-152.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; TOLEDO, M. P. S.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. R.; SILVA, I. A. C.; PEDROSA, E. M. R. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 215, p. 1-9, 2022.

LIMA, R. P; SILVA, A. P; GIAROLA, N. F.B. Changes in soil compaction indicators in response to agricultural field traffic. Seul - Coreia do Sul: **Biosystems Engineering**, 2017.

LIN, B. B. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. **BioScience**, Oxford, v. 61, n. 3, p. 183-193, 2011.

LINDEN, D. R.; VAN DOREN Jr.; D. M. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 6, p. 1560-1565, 1986.

MANSANO, P. H. P. **Plantas De Cobertura E Sua Influência Na Compactação Do Solo**. São Paulo, 2020.

MASCIANDARO, G.; MACCI, C.; PERUZZI, E.; DONI, S. Soil carbon in the world: ecosystem services linked to soil carbon in forest and agricultural soils. In The future of soil carbon, p. 1-38. Amsterdam, **The Netherlands: Elsevier**, 2018.

MASSAD, F. Obras de terra. **Curso básico de Geotecnia**. 2.ed. Oficina de textos de São Paulo. São Paulo. SP. 215p, 2010.

MCPHEE, J. E.; ANTILLE, D. L.; TULLBERG, J. N.; DOYLE, R. B.; BOERSMA, M. Managing soil compaction - A choice of low-mass autonomous vehicle or controlled traffic? **Biosystem Engineering**, Amsterdam, v. 195, n. 1, p. 227-241, 2020.

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 405, n. 115443, 2022.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. 626p.

MUJDECI, M.; ISILDAR, A. A.; UYGUR, V.; ALABOZ, P.; UNLU, H.; SENOL, H. Cooperative effects of field traffic and organic matter treatments on some compaction-related soil properties. **Solid Earth**, Guangzhou, v.8, n.1, p.189-198, 2017.

MULAZZANI, R. P.; GUBIANI, P. I.; ZANON, A. J.; DRESCHER, M. S.; SCHENATO, R. B.; GIRARDELLO, V. C. Impact of soil compaction on 30-year soybean yield simulated with CROPGRO-DSSAT. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 203, n. 103523, 2022.

MUSTAFA, W., TARIQ, K., ZAFAR, H., MAJEED, T., KHAN, M. I., KHAN, M. E., ALI, S., NAZAR, M. Z. K., LATIF, A., KHALIQ, A., SHAMIM, F., HANIF, M. Correlation coefficient analysis among morphological characters under normal

and temperature stress in soybean (*Glycine max* L.). **Biological and Clinical Sciences Research Journal**, v. 4, n. 1, p. 1-7, 2023.

NAEIMI, K. J.; BARADARAN, H.; AHMADI, R.; SHEKARI, M. Study and simulation of the effective factors on soil compaction by tractors wheels using the finite element method. **Journal of Computational Applied Mechanics**, v. 46, n. 2, p. 107-115, 2015.

NGO-CONG, D.; ANTILLE, D. L.; VAN GENUCHTEN, M. T.; NGUYEN, H. Q.; TEKESTE, M. Z.; BAILLIE, C. P.; GODWIN, R. J. A modeling framework to quantify the effects of compaction on soil water retention and infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 85, n. 6, p. 1931-1945, 2021.

NICHOLLS, C. I.; ALTIERI, M. A.; SALAZAR, A. H.; LANA, M. A. Agroecologia e o desenho de sistemas agrícolas resilientes às mudanças climáticas. **Revista Agriculturas: experiências em agroecologia**, Rio de Janeiro, n. 2, 34 p. 2015.

OLIVEIRA, J. A. T.; CÁSSARO, F. A. M.; PIRES, L. F. Estimating soil porosity and pore size distribution changes due to wetting-drying cycles by morphometric image analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 205, n. 104814, 2021.

PERDOK, U. D.; KROESBERGEN, B.; HOOGMOED, W. B. Possibilities for modeling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 61-75, 2002.

PÉRTILE, P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; HOLTHUSEN, D.; COSTA, A. Rheological Parameters as Affected by Water Tension in Subtropical Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, n. e0150286, p. 1-14, 2016.

PETRYK, A.; KRUK, E.; RYCZEK, M.; LACKÓOVÁ, L. Comparison of Pedotransfer Functions for Determination of Saturated Hydraulic Conductivity for Highly Eroded Loess Soil. **Land**, Amsterdam, v. 12, n. 3, p. 610, 2023.

PILLON, C. N.; SCIVITTARO, W. B.; POTES, M. L. P.; MORAES, C. S.; MICHELS, G. H.; PEREIRA, J. S. Acúmulo de carbono orgânico por sistemas de cultura sob plantio direto em terras baixas. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 1040-1043, 2007.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F. A Fast, Simple and Versatile Algorithm to Fill the Depressions of Digital Elevation Models. **Catena**, Amsterdam, v. 46, n. 2-3, p. 159-176, 2002.

PRIMAVESI, A. Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais. **NBL Editora**, 2002.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos

compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 929-938, 2000.

RAPER, R. L.; BAILEY, A. C.; BURT, E. C.; WAY, T. R.; LIBERATI, P. Inflation Pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil-tire interface stresses. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, n. 3, p. 685-689, 1995.

RAZAFIMBELO, T. M.; ALBRECH, A.; OLIVE, R.; CHEVALLIER, T.; LARDY, L. C.; FELLER, C. Aggregate associated-C and physical protection in a tropical clayed soil under Malagasy conventional and no-tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, n. 2, p. 140-149, 2008.

REICHARDT, K. Água em sistemas agrícolas. São Paulo: **Manole**, 1990. 188p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP. São Paulo, 1996, 513p.

REICHERT, J. M.; CORCINI, A. L.; AWE, G. O.; REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; GALLARRETA, C. C. G.; DOCAMPO, R. Onion-forage cropping systems on a Vertic Argiudoll in Uruguay: Onion yield and soil organic matter, aggregation, porosity and permeability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 216, n. 105229, 2022.

REICHERT, J. M.; MENTGES, M. I.; RODRIGUES, M. F.; CAVALLI, J. P.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Compressibility and elasticity of subtropical no-till soils varying in granulometry organic matter, bulk density and moisture. **Catena**, Amsterdam, v. 165, p. 345-357, 2018.

REICHERT, J. M.; MORALES, B.; LIMA, E. M.; BASTOS, F.; MORALES, C. A. S.; ARAÚJO, E. F. Soil morphological, physical and chemical properties affecting *Eucalyptus* spp. productivity on Entisols and Ultisols. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 226, n. 105563, 2023.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciências Ambientais**, Ceará, v. 27, p. 29-48, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M., eds. Tópicos Ciência do Solo. Viçosa. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. v. 5, p. 49-134.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades física do solo**. Santa Maria, 2006.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicação**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2005. 192p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. Pedologia: base para distinção de ambientes. 5. ed. rev. **Lavras: UFLA**, 2007. 322 p.

RIZALDI, T.; PUTRI, F. N. E.; RIFAI, M. Effect of Soil Compaction due to Organic Matter and 4-Wheel Tractor Traffic on Sugarcane Growth. **Indian Journal of Agricultural Research**, v. 57, n. 3, p. 352-356, 2023.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, Cambridge, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008.

SCHEINOST, A. C.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Rationalization of soil water retention curves in a highly variable soils cape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, n. 3-4, p. 129-143, 1997.

SCHERPINSKI, C.; URIBE-OPAZO, M. A.; BOAS, M. A. V.; SAMPAIO, S. C.; JOHANN, J. A. Spatial variability of hydraulic conductivity and water infiltration in the soil. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 32, n. 1, p. 7-13, 2010.

SCHJØNNING, P.; LAMANDÉ, M. Models for prediction of soil precompression stress from readily available soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 320, p. 115-125, 2018.

SEDIYAMA, T.; SILVA, F.; BORÉM, A. **Soja: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2015. 333 p.

SÉGALEN, P. Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Tome 1. Introduction générale. Les sols ferrallitiques: leur identification et environnement immédiat. Paris, éditions de l'ORSTOM. **Collection Études et Thèses**. Chile, 1994. 197p.

SEIFU, Y.; HIREMATH, S. S.; TOLA, S.; WAKO, A. Depth and soil physiochemical properties effects on soil compaction in agricultural field. **African Journal of Agricultural Research**, v. 19, n. 2, p. 170-177, 2023.

SEKWAKWA, O.; DIKINYA, O. Tillage-induced compaction: Effects on physical properties of agricultural loamy soils. **Scientific Research and Essays**, v. 7, n. 15, p. 1584-1591, 2012.

SEVEN, K.; GERMANN, P. Water flow in soil macropores II. A combined flow model. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 15-29, 1981.

SHIN, P., SANG, W-G., KIM, J-H., LEE, Y-H., BAEK, J-K., KWON, D-W., CHO, J-L., SEO, M-C. Effects of High Temperature and Drought on Yield and Quality of Soybean. **The Korean Journal of Crop Science**, v. 1, n. 1, p. 346-352, 2020.

SILVA, A. J.; CABEDA, M. S.; CARVALHO, F. G.; LIMA, J. F. Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 76-83, 2006.

SILVA, F. G.; ASSIS JUNIOR, R. N.; TOMA, R. S.; OLIVEIRA, L. S.; MARQUES, E. S.; MOTA, J. C. A. Physical-hydraulic attributes as indicators of functionality of soil pores under different compaction levels. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 35, n. 4, p. 884-893, 2022.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. **Matéria orgânica do solo**. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. (Ed.). *Biologia dos solos dos cerrados*. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 1997. p.467-524.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 391-399, 2006.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEIA, M.; BAJWAA, S. G.; NOWATZKIA, J. Impact of soil compaction due to wheel trac on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.175, p. 234-243, 2018.

SIVASABARI, K.; AJAYKUMAR, R. Soil Resilience: To Mitigate Degraded Soils. **Biotica Research Today**, v. 2, n. 8, p. 783-786, 2020.

SIX, J., FELLER, C., DENEFF, K., OGLE, S.M.; SA, M.J.C. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. **Agronomie**, Versailles, v. 22, n. 7-8, p. 755-775, 2002.

SMITH, C.; JAYATHUNGA, S.; GREGORINI, P.; PEREIRA, F. C.; MCWILLIAM, W. Using Soil Sustainability and Resilience Concepts to Support Future Land Management Practice: A Case Study of Mt Grand Station, Hawea, New Zealand. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 3, p. 1-19, 2022.

SMUCKER, A. J. M. Soybean Crop Responses to Soil Environmental Stresses. **World Soybean Research Conference III**, v. 1, n. 9780429267932, p. 1000-1006, 2022.

SOBUCKI, V.; HOLTHUSEN, D.; BATISTÃO, A. C.; MOTA, J. C. A.; REICHERT, J. M. Potential of rheometry in detecting cohesive soils in Brazil as an additional tool to morphological field description and tensile resistance quantification. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 30, n. e00553, 2022.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdam, v. 74, n. 1-2, p. 65-105, 1996.

SPLIETHOFF, J.; POTT, C. A.; RAMPIM, L.; WATZLAWICK, L. F.; JADOSKI, S. O. Limites de compactação do solo para *Ilex paraguariensis*. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 9, n. 5, p. 1-18, 2020.

STOPPE, N.; HORN, R. Microstructural strength of tidal soils—a rheometric approach to develop pedotransfer functions. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, Amsterdam, v. 66, n. 1, p. 87-96, 2018.

STRUDLEY, M. W.; GREEN, T. R.; ASCOUGH, J.C. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 99, n. 1, p. 4-48, 2008.

SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; ALVES, M. C.; REICHERT, J. M. Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 5, p. 1-19, 2022.

TACONET, O.; CIARLETTI, V. Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 64-76, 2007.

TASSINARI, D. et al. (Ed.). **Conhecendo a vida do solo**. [S.l.]: Editora UFLA: Lavras, 2017. v. 1, p. 32.

TEH, Y. Y.; WONG, J. L.; LEE, M. L. Effect of fines content on soil moisture responses to wetting & drying cycles. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, Amsterdam, v. 129, n. 103313, 2023.

TIAN, L.; LI, J.; BI, W.; ZUO, S.; LI, L.; LI, W.; SUN, L. Effects of water logging stress at different growth stages on the photosynthetic characteristics and grain yield of spring maize (*Zea mays* L.) under field conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 218, p. 250-258, 2019.

TOIGO, S. **Remediação mecânica e biológica da compactação inicial de um nitossolo vermelho cultivado com trigo**. 2010. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco.

TOKURA, L. K.; SECCO, D.; JÚNIOR, L. A. Z.; SIQUEIRA, J. A. C.; ALOVISI, A. M. T.; BARISON, A.; ZIN, Z. Use of cover crops in Oxisol and its effects on yield and soybean oil content. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 10, n. 12, p. 1-17, 2021.

TORMASELLA, J.; HODNETT, M.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 1, p. 327-338, 2000.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo (An overview of soil quality). (Revisão de literatura). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1-14, 2009.

VIDAL VÁZQUEZ, E.; BERTOL, I.; SIQUEIRA, G. M.; PAZFERREIRO, J.; DAFONTE, J. D. Evolution of the soil surface roughness using geostatistical analysis. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 141-152, 2010.

VON-LUTZOW, M.; KÖGEL, K. I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. Stabilization of organic

matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions-a review. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, n. 4, p. 426-445, 2006.

WOLF, B.; SNYDER, G. H. Sustainable Soils. The place of organic matter in sustaining soils and their productivity. **New York: Food Products Press**, Binghamton, 2003, 352p.

XIAO, Z.; YU, N.; NA, J.; ZOU, H.; ZHANG, Y. Soil Compressibility and Resilience Based on Uniaxial Compression Loading Test in Response to Soil Water Suction and Soil Organic Matter Content in Northeast China. **Sustainability**, Amsterdam, v. 14, n. 5, p. 1-15, 2022.

YAZDANPANA, N.; MAHMOODABADI, M.; CERDÀ, A. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. **Geoderma**, Amsterdam, v. 266, n. 1, p. 58-65, 2016.

YUDINA, A.; KUZYAKOV, Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. **Geoderma**, Amsterdam, v. 434, n. 116478, 2023.

ZHANG, M.; TIAN, Z.; ZHU, Q.; CHEN, J. *In-situ* assessment of soil shrinkage and swelling behavior and hydro-thermal regimes with a thermo-time domain reflectometry technique. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 227, n. 105617, 2023.

ZOLDAN JÚNIOR, W.A.; BERTOL, I.; PEGORARO, R.; FABIAN, E.L.; ZAVASCHI, E.; VIDAL VÁZQUEZ, E. Rugosidade superficial do solo formada por escarificação e influenciada pela erosividade da chuva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 353-362, 2008.

Anexo 1

Tabela 6. Caracterização química dos solos por tratamento da camada de 0-0,2 m das áreas experimentais do NEEA - Unioeste, campus Cascavel, PR e do IDR-Paraná - Santa Tereza do Oeste, PR

Amostras	P	pH CaCl ₂	H+Al	Al ³⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	CTC	V	Al
	mg dm ⁻³	0,01 mol L ⁻¹	-----cmol _c dm ⁻³ -----						----%----		
0P - NEEA	8,99	5,20	7,46	0,00	0,54	6,14	2,76	9,44	16,90	55,85	0,00
1P - NEEA	3,80	4,54	7,76	0,30	0,48	4,64	1,81	6,93	14,69	47,18	4,15
3P - NEEA	4,15	5,10	9,70	0,00	0,68	6,71	1,56	8,96	18,66	48,02	0,00
5P - NEEA	5,66	4,70	7,08	0,05	0,72	6,66	2,59	9,97	17,05	58,48	0,50
0P - IDR-Paraná	46,96	5,15	5,30	0,00	1,21	8,58	2,10	11,89	17,19	69,17	0,00
1P - IDR-Paraná	37,06	5,16	6,77	0,00	0,84	7,63	1,69	10,16	16,93	60,01	0,00
3P - IDR-Paraná	42,42	4,44	10,13	0,15	0,79	5,64	2,35	8,77	18,90	46,40	1,68
5P - IDR-Paraná	24,58	4,67	7,92	0,45	0,81	5,51	1,32	7,64	15,56	49,11	5,56

P - Fósforo - Al³⁺-Alumínio - H⁺+Al³⁺ - Alumínio potencial - Ca²⁺-Cálcio - Mg²⁺-Magnésio- K⁺ -Potássio -SB - Soma de bases - CTC - Capacidade de troca de cátions - V - Saturação por bases - Al - Saturação por alumínio.

Anexo 2

Tabela 7. Teor de MOS (%) nas áreas experimentais (NEEA/IDR-Paraná). (Valores médios de 5 repetições da camada de 0-0,3 m)

NEEA								
Variável	Observações	C orgânico (mg)				Fator correção	MOS (%)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo		Média	
MOS	60	2020/2021		2021/2022		1,724	2020/2021	2021/2022
		1,060	1,8142	1,071	1,884		2,5187	2,5015
IDR-Paraná								
Variável	Observações	C orgânico (mg)				Fator correção	MOS (%)	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo		Média	
MOS	60	2020/2021		2021/2022		1,724	2020/2021	2021/2022
		2,2390	2,9850	2,2190	3,0130		4,4952	4,5012

Anexo 3

Tabela 8. Composição granulométrica do solo nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m das áreas experimentais do NEEA - Unioeste, *campus* Cascavel, PR e do IDR-Paraná - Santa Tereza do Oeste - PR (valores médios de 3 repetições)

Granulometria (NEEA)			
Camada	Areia	Argila	Silte
(m)	g kg⁻¹		
0,0-0,1	48,5	520,0	431,5
0,1-0,2	43,3	694,6	262,1
0,2-0,3	48,7	712,5	238,8
Média	46,8	642,3	310,8
Granulometria (IDR-Paraná)			
Camada	Areia	Argila	Silte
(m)	g kg⁻¹		
0,0-0,1	44,9	561,1	394,1
0,1-0,2	38,7	641,9	319,4
0,2-0,3	24,7	706,2	269,1
Média	36,1	636,4	327,5

Método da pipeta, conforme USDA-Soil Conservation Service. Soil Survey Investigations Reports n. 1. Whashington, 1972. 63 p.

Anexo 4

Tabela 9. Índice de rugosidade superficial do solo (NEEA) na safra 2020/2021

NEEA	03/09/2020	07/12/2020	15/12/2020	11/01/2021	11/02/2021	05/04/2021
	AC	DC	-----	DURANTE O CICLO DA SOJA -----		
0PR1	0,6400	0,6400	0,5400	0,4700	0,5300	0,4400
0PR2	0,7200	0,7200	0,4800	0,6200	0,4900	0,4400
0PR3	0,7900	0,7900	0,5000	0,5300	0,4990	0,3900
0PR4	0,8300	0,8300	0,5400	0,4100	0,6400	0,5600
0PR5	0,4500	0,4500	0,4200	0,3700	0,4700	0,3400
1PR1	0,7400	0,6200	0,5200	0,4700	0,4500	0,3900
1PR2	0,7300	0,6800	0,4700	0,4300	0,6000	0,4600
1PR3	0,6800	0,5800	0,5000	0,4800	0,5200	0,4700
1PR4	0,7600	0,5200	0,4300	0,4300	0,4800	0,3500
1PR5	0,5800	0,6000	0,5100	0,4700	0,5300	0,3300
3PR1	0,5300	0,4700	0,3600	0,3000	0,4300	0,2800
3PR2	0,6100	0,3800	0,3400	0,2600	0,3600	0,3200
3PR3	0,8200	0,5100	0,5100	0,4300	0,4500	0,4600
3PR4	0,6800	0,5200	0,4600	0,4000	0,6000	0,2600
3PR5	0,4700	0,4000	0,3800	0,3400	0,3000	0,3500
5PR1	0,4900	0,4600	0,4200	0,3300	0,3400	0,3100
5PR2	0,7000	0,4100	0,3100	0,3500	0,3500	0,3200
5PR3	0,8027	0,5300	0,5200	0,4100	0,4900	0,3700
5PR4	0,7600	0,5000	0,3900	0,6400	0,5000	0,3700
5PR5	0,6400	0,3400	0,3100	0,2900	0,2700	0,2400

AC: antes da compactação. **DC:** depois da compactação.

Tabela 10. Índice de rugosidade superficial do solo (NEEA) na safra 2021/2022

NEEA	06/10/2021	08/10/2021	19/10/2021	12/11/2021	07/02/2022	14/03/2022
	AC	DC	-----	DURANTE O CICLO DA SOJA	-----	
0PR1	0,6540	0,6540	0,4990	0,4020	0,3830	0,4400
0PR2	0,5920	0,5920	0,5840	0,4820	0,4250	0,4700
0PR3	0,6300	0,6300	0,5490	0,4370	0,3590	0,3280
0PR4	0,6280	0,6280	0,5730	0,4540	0,3840	0,4160
0PR5	0,4840	0,4840	0,6040	0,3550	0,3830	0,3750
1PR1	0,8607	0,7918	0,5318	0,4683	0,3996	0,4296
1PR2	0,5616	0,5163	0,3977	0,3527	0,3305	0,3140
1PR3	0,5621	0,5819	0,4226	0,3354	0,3461	0,3149
1PR4	0,6362	0,5791	0,3818	0,436	0,3805	0,4046
1PR5	0,6888	0,7210	0,4013	0,4354	0,4041	0,3655
3PR1	0,6435	0,5935	0,5488	0,4193	0,3606	0,4779
3PR2	0,4798	0,5043	0,3974	0,4016	0,2928	0,3845
3PR3	0,4799	0,5153	0,4092	0,3965	0,3696	0,3479
3PR4	0,4668	0,6879	0,4778	0,4344	0,2745	0,2553
3PR5	0,7429	0,6066	0,4880	0,5311	0,3395	0,3479
5PR1	0,8376	0,8536	0,7598	0,6689	0,6772	0,7775
5PR2	0,6592	0,4446	0,4552	0,4672	0,3528	0,3720
5PR3	0,6267	0,6620	0,6071	0,516	0,3231	0,3336
5PR4	0,7435	0,7959	0,6016	0,4877	0,4707	0,4656
5PR5	0,6472	0,5962	0,4415	0,3960	0,3252	0,3286

AC: antes da compactação. **DC:** depois da compactação.

Tabela 11. Índice de rugosidade superficial do solo (IDR-Paraná) na safra 2020/2021

IDR-Paraná	21/09/2020	02/12/2020	08/12/2020	17/12/2020	03/02/2021	06/04/2021
	AC	DC	----- DURANTE O CICLO DA SOJA -----			
0PR1	0,6400	0,6400	0,6000	0,4700	0,4500	0,4600
0PR2	0,8000	0,8000	0,6100	0,6400	0,5100	0,5200
0PR3	0,5900	0,5900	0,5900	0,4400	0,3700	0,3300
0PR4	0,7700	0,7700	0,6800	0,5000	0,4600	0,4200
0PR5	0,5500	0,5500	0,5000	0,3900	0,3800	0,3900
1PR1	0,7900	0,5000	0,4400	0,4200	0,4100	0,4000
1PR2	0,8400	0,6400	0,4900	0,5100	0,5700	0,3200
1PR3	0,9300	0,6000	0,5900	0,4600	0,4000	0,3800
1PR4	0,9700	0,6900	0,5700	0,4200	0,3300	0,5000
1PR5	0,8000	0,6000	0,5300	0,2800	0,2700	0,3200
3PR1	0,6200	0,4800	0,3200	0,3300	0,4100	0,3100
3PR2	0,7100	0,6800	0,3700	0,3600	0,5500	0,2600
3PR3	0,5800	0,4600	0,3100	0,2400	0,2900	0,3100
3PR4	0,6700	0,4800	0,4400	0,3600	0,3200	0,5200
3PR5	0,6700	0,4200	0,4000	0,3000	0,3300	0,2400
5PR1	0,6800	0,5200	0,4100	0,4400	0,4400	0,3000
5PR2	0,6400	0,5100	0,4700	0,2900	0,3700	0,3200
5PR3	0,6100	0,4800	0,3500	0,3400	0,3400	0,2800
5PR4	0,6400	0,5600	0,4800	0,2700	0,3700	0,3000
5PR5	0,7600	0,4400	0,3200	0,3200	0,3000	0,3600

AC: antes da compactação. **DC:** depois da compactação.

Tabela 12. Índice de rugosidade superficial do solo (IDR-Paraná) na safra 2021/2022

IDR-Paraná	05/10/2021	05/10/2021	19/10/2021	12/11/2021	24/01/2022	10/03/2022
	AC	DC	----- DURANTE O CICLO DA SOJA -----			
0PR1	0,6270	0,6270	0,7480	0,6530	0,6480	0,5390
0PR2	0,4210	0,4210	0,5130	0,4720	0,5210	0,6240
0PR3	0,6920	0,6920	0,4510	0,4830	0,4590	0,4030
0PR4	0,7120	0,7120	0,7530	0,6930	0,5990	0,5340
0PR5	0,6690	0,6690	0,5910	0,5110	0,5270	0,4520
1PR1	0,6497	0,7044	0,5382	0,4507	0,4335	0,3850
1PR2	0,6340	0,6220	0,6759	0,5643	0,6239	0,3682
1PR3	0,8390	0,9376	0,5680	0,5350	0,5456	0,4943
1PR4	0,9526	0,8913	0,7009	0,7974	0,7283	0,4043
1PR5	0,9458	1,0065	0,6766	0,6460	0,5849	0,5107
3PR1	0,5875	0,5151	0,5640	0,4139	0,4122	0,3971
3PR2	0,5611	0,4978	0,5309	0,3895	0,5041	0,4027
3PR3	0,8680	0,7848	0,7848	0,5658	0,5472	0,5454
3PR4	0,6410	0,6497	0,5133	0,3722	0,4117	0,3455
3PR5	0,5363	0,5579	0,5196	0,3949	0,3968	0,3421
5PR1	0,7586	0,5271	0,6875	0,5799	0,5238	0,4269
5PR2	0,6576	0,6128	0,6283	0,5454	0,4001	0,4028
5PR3	0,5157	0,5664	0,4502	0,4225	0,6167	0,3048
5PR4	0,5792	0,4883	0,5066	0,4090	0,4569	0,3241
5PR5	0,5823	0,6367	0,5627	0,5402	0,4948	0,4753

AC: antes da compactação. **DC:** depois da compactação.