

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON**

MARCIO ANDRÉ FRANZISKOWSKI

**EFEITO DA ESCARIFICAÇÃO MECÂNICA E BIOLÓGICA NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS DE UM LATOSSOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SUCESSÃO**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2018

MARCIO ANDRÉ FRANZISKOWSKI

**EFEITO DA ESCARIFICAÇÃO MECÂNICA E BIOLÓGICA NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS DE UM LATOSSOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA EM SUCESSÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientador: Dr^a. Edleusa Pereira Seidel
Coorientador: Dr. Emerson Fey

MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PARANÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

F826e

Francziskowski, Marcio André

Efeito da escarificação mecânica e biológica nas propriedades físicas de um Latossolo e produtividade da soja em sucessão. / Marcio André Francziskowski. Marechal Cândido Rondon, 2018.
45 f.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Edleusa Pereira Seidel

Coorientador: Prof. Dr. Emerson Fey

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná,
Campus de Marechal Cândido Rondon, 2018
Programa de Pós-Graduação em Agronomia

1. Ciência do solo. I. Seidel, Edleusa Pereira. II. Fey, Emerson. III.
Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 20.ed. 631.4
CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Beijo – CRB 9^a/965



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46

Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>

Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000

Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ

GOVERNO DO ESTADO

MÁRCIO ANDRÉ FRANZISKOWSKI

Efeito da escarificação mecânica e biológica nas propriedades físicas de um Latossolo e produtividade da soja em sucessão

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, linha de pesquisa Sistemas de Produção Vegetal Sustentáveis, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a) - Edleusa Pereira Seidel

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

Emerson Fey

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

Jean Sérgio Rosset

Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS)

Marechal Cândido Rondon, 23 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida que me concedestes, acompanhando e guiando nos momentos de dificuldades e tempestades, conseguindo alcançar meus objetivos através das portas que se abrissem em minha trajetória de vida até o presente momento.

Quero agradecer meus pais, Deonísio Francziskowski e Maria S. Francziskowski, que não mediram esforços para me ajudar nos momentos de dificuldade, nas duras lições e conselhos que me foram dados, que com certeza foram extremamente úteis para a minha caminhada, assim como a coparticipação da minha querida irmã Andressa, auxiliando no que era necessário.

A minha namorada Suelenatane Ferreira da Silva que desde que nós nos conhecemos, sempre esteve do meu lado, brigando e brincando, porém, sendo prestativa e incentivadora dos meus sonhos.

A Professora Dr. Edleusa Pereira Seidel, inspiração de pessoa e profissionalismo, me orientando desde a graduação até o presente momento, onde passamos por várias batalhas, que graças a sua paciência, confiança e dedicação, contribuiu para este trabalho ter tamanho significado para nós.

Ao Professor Dr. Emerson Fey pela amizade adquirida ao longo da faculdade, ao auxílio prestado durante a graduação que serviu de inspiração para a continuidade de um trabalho relevante, onde sua orientação contribuiu claramente para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores Dr. Paulo Sérgio Rabello de Oliveira e Dr. Cláudio Yuji Tsutsumi que contribuíram com sábias palavras para agregarmos conhecimento juntos e auxiliaram na discussão dos resultados. Agradeço também aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia da UNIOESTE e as secretárias do PPGA, Leila e Marciane.

Aos meus colegas Katiely Aline Anschau e Marcos César Mottin, aos tempos que passamos juntos, estudando ou realizando nossas análises, e assim conseguimos concluir nossos trabalhos. Agradeço também aos colegas Giovani de Oliveira Andrezza, Andressa Perini, Claudia Tochetto, Daniela Herrmann, Claudécir Martins e Vinicius Miranda que auxiliaram em todo o experimento a campo. Agradeço também aos colegas do Programa de Pós-graduação em Agronomia da UNIOESTE.

Ao Professor Dr. Jean Sérgio Rosset e ao técnico Jucenei Fernando Frandoloso do Laboratório de Fertilidade do solo da UNIOESTE, que prestaram auxílio nas análises do solo.

A técnica do laboratório de Física do solo da UNIOESTE Isa Layana Galdino que auxiliou nos trabalhos de laboratório.

Ao Marcelo Junior Lang e Ademar da Silva e demais colegas do Núcleo de Estações Experimentais da UNIOESTE, que auxiliaram na implantação e condução do projeto de pesquisa a campo.

Agradeço também de forma especial a empresa Fertilizantes Heringer, a qual sou grato por fazer parte da equipe, aos colegas de profissão Leandro Bonadio Machado, Leandro Pontarolo, Clovis Fagan, Osmael Caetano, Fabio Luppi, George Carius e Sergio Mazzarino e todos os demais.

A todos, meu Muito Obrigado.

RESUMO

FRANCZISKOWSKI, Marcio André, Engenheiro Agrônomo, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fevereiro de 2018. **Efeito da escarificação mecânica e biológica nas propriedades físicas de um Latossolo e produtividade da soja em sucessão.** Orientadora: Edleusa Pereira Seidel. Coorientador: Emerson Fey.

Os solos argilosos da região Oeste do Paraná são suscetíveis a compactação devido a sua textura e estrutura que favorecem a reconsolidação do solo após intervenções externas. Aliado a adoção de modelos agrícolas inadequados ou insustentáveis, a compactação e a degradação do solo são visíveis e requerem a adoção urgentes de práticas corretivas. Assim, o objetivo deste trabalho consistiu em avaliar métodos de descompactação do solo, escarificação mecânica e biológica, nas propriedades físicas do solo e também avaliar o efeito destas práticas sobre a cultura da soja cultivada em sucessão. O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizada em Entre Rios do Oeste, em delineamento de blocos casualizados, com arranjo em parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas principais foram caracterizadas pelo plantio direto e pelo preparo reduzido do solo, manejo realizado com escarificador de hastes. Nas subparcelas foram cultivadas diferentes espécies vegetais com o intuito de serem utilizadas como plantas de cobertura, sendo o cultivo do trigo, consórcio de ervilha forrageira com aveia preta, consórcio de aveia preta com nabo forrageiro. Após 120 dias da semeadura, ocasião que as plantas de cobertura foram manejadas, foram avaliados a porosidade e densidade do solo, agregação e estabilidade de agregados, e a resistência do solo a penetração. Posteriormente, a cultura da soja foi implantada e conduzida na área experimental, e quando finalizou seu ciclo, avaliou-se o rendimento de grãos desta cultura e novamente as propriedades físicas do solo. Os resultados demonstraram que a prática da escarificação mecânica do solo para mitigação da compactação teve efeito residual curto, levando a reconsolidação da estrutura do solo após nove meses da operação, com exceção da diminuição da resistência do solo a penetração. Com o cultivo das plantas de cobertura, foi possível observar efeitos positivos sobre as propriedades físicas do solo, como redução da densidade e incremento da porosidade de aeração, o que possibilita o uso destas plantas num manejo de descompactação aliado ao uso de métodos mecânicos. As práticas de escarificação mecânica e biológica não alteraram o rendimento de grãos da cultura da soja cultivada em sucessão.

Palavras-chave: compactação do solo; escarificador de hastes; manejo de descompactação do solo; plantas de cobertura.

ABSTRACT

FRANCZISKOWSKI, Marcio André. Agricultural Engineer, State University of Western Paraná [Universidade Estadual do Oeste do Paraná], February 2018. **Effect of Mechanical and Biological Scarification on the Physical Properties of a Latosol and Soybean Crop in Succession**. Advisor: Edleusa Pereira Seidel. Co-advisor: Emerson Fey.

The clay soils of western Paraná are susceptible to compaction for having a texture and a structure that favor soil reconsolidation after external interventions. Coupled with the adoption of unsuitable or unsustainable agricultural models, soil compaction and degradation are visible and require urgent adoption of corrective practices. Thus, the objective of this research was to assess methods for soil decompaction, as well as mechanical and biological scarification, and to assess the effect of these practices on soil physical properties and soybean crops in succession. The experiment was conducted at State University of Western Paraná's Experimental Station, located in Entre Rios do Oeste, in a randomized block design, with subdivided plots and four replications. The main plots were characterized by no-tillage and reduced tillage farming, which was performed with a chisel plow. In the subplots, different plant species were cultivated to be used as cover crops – wheat, forage pea consortium with black oats, black oats consortium with forage turnip. After 120 days of sowing, when the cover plants were handled, soil porosity and density, aggregation and aggregate stability, and soil penetration resistance were assessed. Subsequently, the soybean crop was implanted and managed in the experimental area and, at the end of its cycle, the grain yield of the crop was assessed, and so was the physical properties of the soil again. Results showed that mechanical soil scarification for compaction mitigation had a short residual effect, leading to the reconsolidation of the soil structure after nine months of operation, except for reduction of soil penetration resistance. With the cultivation of cover crops, it was possible to observe positive effects on the physical properties of the soil, such as reduced density and increased aeration porosity, which allows the use of these plants in decompaction together with mechanical methods. Mechanical and biological scarification practices did not change the grain yield of the soybean crop in succession.

Keywords: soil compaction; chisel plow; soil decompaction handling; cover plants.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	8
3 CAPÍTULO I: PLANTAS DE COBERTURA CULTIVADAS EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO ALTERAM AS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO EM SEU PRIMEIRO CICLO DE CULTIVO?	12
3.1 RESUMO	12
3.2 ABSTRAT	13
3.3 INTRODUÇÃO.....	13
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.4.1 Localização, clima e solo da área de estudo	15
3.4.2 Delineamento experimental.....	16
3.4.3 Avaliações das propriedades físicas do solo.....	17
3.4.4 Análise dos dados	18
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.6 CONCLUSÕES	24
3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
4 CAPÍTULO II: ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA SOB PALHADA DE PLANTAS DE COBERTURA CULTIVADAS EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO	28
4.1 RESUMO	28
4.2 ABSTRAT	29
4.3 INTRODUÇÃO.....	29
4.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
4.4.1 Localização, clima e solo da área de estudo	31
4.4.2 Delineamento experimental.....	32
4.4.3 Avaliação da produtividade da soja.....	33
4.4.4 Avaliações das propriedades físicas do solo.....	34
4.4.5 Análise dos dados	34
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.6 CONCLUSÕES	40
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

5 CONCLUSÕES GERAIS	44
6 CONSIDERAÇÕES GERAIS	45

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil ocupa uma posição de destaque entre os maiores produtores mundiais de soja em decorrência da elevada produtividade associada aos baixos custos de produção, tornando o produto competitivo no mercado internacional (SILVA; LIMA; BATISTA, 2011). A introdução de novas tecnologias, aliado ao empenho da pesquisa e evolução da cadeia produtiva, possibilitou aumento de renda e emprego para a população brasileira, e permitiu atingir patamares de 114 milhões de toneladas do produto na safra 2016/2017 (USDA, 2017).

Fonte de proteína inesgotável para alimentação animal, os grãos de soja também configuram crescente uso na alimentação humana, tanto in natura como na produção de óleo de soja e derivados (ESPÍNDOLA; CUNHA, 2015). Fatores estes que contribuem para que seja o carro-chefe da agricultura nacional, dando status ao país como segundo maior produtor mundial e maior exportador de soja do mundo (CONAB, 2017; USDA, 2017).

Desta forma, a soja se firmou como um dos produtos de maior relevância na agricultura nacional e na balança comercial, em decorrência da adaptabilidade da cultura as condições edafoclimáticas do país, facilidade de mecanização total da cultura, o surgimento de cooperativas que auxiliam o produtor na hora da comercialização, o estabelecimento de uma rede de pesquisa tanto estadual como nacional e o crescente consumo e demanda por soja no mundo (ESPÍNDOLA; CUNHA, 2015).

Apesar das vantagens brasileiras para a produção de grãos de soja, o Brasil apresenta desafios que, se ultrapassados, poderiam colocá-lo como maior produtor mundial da oleaginosa, destacando-se fatores que envolvem o armazenamento de grãos e a cadeia logística (SILVA; LIMA; BATISTA, 2011).

A base para a produção da soja e de toda agricultura é o solo, recurso natural de lenta renovação e de fácil degradação quando manejado de forma incorreta (KLEIN et al., 2008). O crescimento populacional tem provocado crescente demanda por alimentos com poucas opções de aumento de áreas cultivadas no mundo. Por isso, é imprescindível que o solo seja manejado corretamente a fim de oferecer condições favoráveis para o suprimento de água, oxigênio e nutrientes para as plantas, possibilitando as mesmas expressarem seu potencial genético de produtividade (BLAINSKI et al., 2012).

Visto isto, o sistema de manejo empregado exerce forte influência na qualidade estrutural do solo, e pode alterar suas características físico-químicas. De acordo com

Drescher et al. (2012) a adoção de modelos agrícolas inadequados ou insustentáveis vem promovendo a degradação do solo.

O principal problema está voltado ao inadequado processo de adoção e implantação do sistema plantio direto (SPD) pelos agricultores (DRESCHER, 2011). Este sistema não consiste em somente eliminar operações de mobilização do solo e controlar as plantas daninhas por meio de herbicidas. Ele preconiza também a diversificação de espécies através da rotação de culturas e cobertura vegetal permanente do solo (DONEDA et al., 2012; INAGAKI et al., 2016), com objetivos de otimizar a estruturação do solo e o aporte de matéria orgânica (SEIDEL et al., 2017) e proteção contra os processos erosivos (LANZANOVA et al., 2010).

O cultivo de plantas de cobertura propicia proteção superficial do solo contra o impacto das gotas da chuva, promovem acúmulo de carbono no solo através da matéria orgânica, a qual beneficia as propriedades físico-químicas deste (SEIDEL et al., 2015). As plantas de cobertura mais utilizadas para este fim no Sul do Brasil são a aveia preta, tremoço comum, ervilhaca e nabo forrageiro (SANCHEZ et al., 2014); porém, como abordado por Girardello (2010), o cultivo destas plantas de cobertura nas áreas agrícolas não apresenta retorno financeiro direto e imediato ao agricultor, o que resulta em plantio de monoculturas, ou a sucessão de culturas.

Aliado ao monocultivo, o solo sendo manejado com tráfego de máquinas e implementos agrícolas de elevada massa em condições de alto teor de água no solo (MAZURANA et al., 2011), resulta em elevadas cargas e pressões exercidas sobre o solo. Conseqüentemente, ocorre aumento da densidade e da resistência do solo a penetração das raízes, bem como diminuição da macroporosidade, diagnosticando este processo como compactação do solo (SUZUKI et al., 2008; DRESCHER et al., 2012).

De acordo com a literatura (SUZUKI et al., 2008; SECCO et al., 2009), os efeitos mais pronunciados da compactação do solo está compreendida entre as profundidades de 0,08 a 0,15 m, isto porque na camada superficial há maior concentração de matéria orgânica, maior atividade biológica e volume radicular das plantas, o que propicia uma baixa densidade e elevada porosidade total (MEDEIROS et al., 2015). Secco et al. (2009) ainda destacam a ação do disco ou do facão das semeadoras-adubadoras que também auxiliam no processo de descompactação do solo nesta camada. Ao passo que a ausência destes mecanismos a profundidades maiores e a acomodação de toda a pressão exercida na superfície a estas

profundidades, contribuem para que esta camada (0,08 a 0,15 m) apresente-se compactada pela ausência de revolvimento ou crescimento radicular (DRESCHER, 2011).

Segundo Seki et al. (2015), um dos fatores limitantes para a obtenção do potencial máximo de produtividade das culturas manejadas em plantio direto tem sido as alterações nos atributos físicos do solo, relacionados a porosidade de aeração e armazenamento de água no solo, que tem estreita relação com a compactação do solo. Seus efeitos são observados em restrições ao crescimento radicular das plantas e consequentemente concentração de raízes na camada superficial do solo, levando a diminuição da absorção de água e nutrientes (JIMENEZ et al., 2008; KLEIN; BASEGGIO; MADALOSSO, 2009). Períodos de déficit hídrico evidenciam ainda mais este problema, impedindo as raízes de acessar profundidades maiores para suprir suas necessidades (KLEIN et al., 2008).

Como a compactação é o aumento da massa, ou redução do espaço poroso em um determinado volume de solo, existe uma estreita relação desta com outras propriedades físicas do solo (MOTTIN, 2016). Dentre elas, destacam-se propriedades relacionadas a aeração e armazenamento de água no solo (RICHART et al., 2005).

A macroporosidade é responsável pela porosidade de aeração do solo, influenciando diretamente nas trocas gasosas entre o sistema solo-atmosfera, na capacidade de infiltração de água e percolação no solo (VALICHESKI et al., 2012). Já a microporosidade é responsável pela capacidade de retenção de água e solutos no solo (PIRES et al., 2008). Estas propriedades tem variação conforme ocorrem alterações na estrutura do solo, aumento da compactação diminui a quantidade de macroporos e tende a elevar a microporosidade (SANCHEZ et al., 2014).

A fim de garantir suprimento de oxigênio as raízes das plantas e também para a vida microbiana do solo, deve-se ter um mínimo suficiente de macroporosidade no solo (KLEIN; CAMARA, 2007). Segundo Valicheski et al. (2012), valores da porosidade de aeração devem ficar acima de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para que não limite os processos metabólicos da planta (BEULTER; CENTURION, 2004) e não ocorra acúmulo de gás carbônico na área radicular (SILVA; BARROS; COSTA, 2006). A diminuição da microporosidade contribui também para este problema e afeta o armazenamento de água no solo. Portanto, faz-se necessário manter uma relação entre macro/microporos no solo com valores adequados, onde a macroporosidade deve ser 33% da porosidade total e a microporosidade 66% (PIRES et al., 2008).

A macroporosidade se relaciona inversamente proporcional a densidade do solo, onde situações de compactação oriundas do aumento da densidade e diminuição da macroporosidade,

se alteram a distribuição das raízes ao longo do perfil do solo (FOLONI; CALONEGO; LIMA, 2003), e estas diminuem seu diâmetro a fim de penetrarem nos poros menores (BEULTER; CENTURION, 2004). Para Jimenez et al. (2008), sob condições de menor macroporosidade e maior densidade do solo na superfície, há possibilidade de reduções significativas na produtividade das culturas quando da ocorrência de déficit hídrico nos estágios fenológicos críticos.

A densidade do solo é o resultado do aumento da massa de solo contida numa unidade de volume, interferindo em propriedades como infiltração e retenção de água no solo, desenvolvimento radicular, nas trocas gasosas e suscetibilidade do solo aos processos erosivos (GUARIZ et al., 2009), sendo uma propriedade física largamente utilizada nas avaliações de compactação do solo. De maneira geral, o valor de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ é aceito como limite crítico da densidade para solos com mais de 55% de argila, aumentando com o decréscimo do teor de argila no solo (REINERT et al., 2008).

Simultaneamente ao aumento da densidade do solo em áreas compactadas ocorre o aumento da resistência mecânica do solo a penetração de raízes, confinando as raízes acima da camada compactada ou em partes de menor restrição ao crescimento (GENRO JUNIOR et al., 2009), e diminuição do volume de solo explorado pelas raízes, conseqüentemente, uma redução na quantidade de ar, água e nutrientes disponíveis para as plantas (KLEIN; BASEGGIO; MADALOSSO, 2009).

Com a determinação da resistência a penetração (RP) é possível quantificar a resistência física do solo na camada de atuação do sistema radicular das plantas, e a verificação da camada de solo que encontra-se com maior grau de compactação, informação importante para a tomada de decisão para corrigir o problema (LIMA; LEÓN; SILVA, 2013). Porém, a determinação de valores limitantes em relação a produtividade e ao desenvolvimento das culturas em diferentes solos agrícolas ainda é uma incógnita, pois tem relação direta com o conteúdo de água no momento da avaliação e varia de acordo com a densidade e textura do solo em questão (VALICHESKI et al., 2012; SANCHEZ et al., 2014), sendo de modo geral, valores acima de 2,0 MPa tido como referência para condições de impedância ao crescimento radicular (CHIG; OLIVEIRA; CRESTANI, 2014).

A constatação de solo compactado baseia-se nos valores obtidos nas avaliações destas propriedades físicas, porém é imprescindível levar em consideração o manejo adotado na área e os cultivos agrícolas, que interpretados juntos, expressam a verdadeira condição física do solo (RICHART et al., 2005). As propriedades intrínsecas de determinados solos podem ainda

expressar a suscetibilidade a compactação, como a capacidade deste em reter maior umidade e, desta forma, transmitir a pressão exercida da superfície, pelos maquinários e implementos agrícolas, a maiores profundidades e valores, observado principalmente em Latossolos (SILVA, 2011). A utilização de culturas anuais cultivadas sucessivamente e/ou alternadas na mesma área é um manejo que também leva a suscetibilidade a compactação, pois a área do solo explorada pelo sistema radicular fica limitada ao desenvolvimento radicular daquela espécie, reduzindo a formação de poros após decomposição e o incremento de matéria orgânica diversificada para manutenção da biodiversidade do solo (SANCHEZ et al., 2014).

Portanto, o emprego de técnicas racionais de manejo do solo desencadeariam a mitigação do problema de compactação no solo, sendo necessário boas práticas agrícolas aliadas ao cultivo agrícola diversificado, acompanhado de avaliações periódicas das propriedades físicas do solo para valores desejáveis (JIMENEZ et al., 2008; VALICHESKI et al., 2012).

Além destas avaliações rotineiras, outra propriedade do solo que pode ser utilizada para validação da adoção do SPD, é a estabilidade de agregados (INAGAKI et al., 2016), uma vez que a agregação das partículas do solo está ligado ao aporte de matéria orgânica, exsudatos de raízes e microrganismos, e o manejo do solo (ARATANI et al., 2009; SEIDEL et al., 2017). Havendo retrocesso no manejo do plantio direto nas áreas agrícolas, a agregação do solo sofre consequências que podem levar a diluição da estabilidade dos agregados do solo e aumento da erosão e perda de solo (SALTON et al., 2008).

Em áreas agrícolas com elevado grau de compactação, onde se observa diminuição de produtividade das culturas relacionado a este problema, o uso de métodos mecânicos como os escarificadores e/ou subsoladores tem sido uma alternativa para a descompactação do solo (CAMARA; KLEIN, 2005), cujo formato das hastes deste equipamento permite que a camada compactada seja rompida sem afetar o nivelamento do terreno (SILVEIRA JUNIOR et al., 2012). Esta prática é relatada por diversos autores como temporária (FERRERAS et al. 2000), onde transcorrido certo período de tempo, ocorre a reconsolidação do solo.

Nicoloso et al. (2008) verificaram que a escarificação mecânica num Latossolo de textura muito argilosa não mostrou melhorias nas condições físicas (densidade do solo e resistência do solo a penetração) nove meses após a operação. Drescher et al. (2016) avaliaram as propriedades físico-hídricas de um Latossolo argiloso ao longo do tempo (0, 6, 12, 18, 24, 30 e 36 meses), após a operação da escarificação mecânica em SPD, e concluíram que as

alterações provocadas por este manejo na densidade, porosidade total e macroporosidade do solo, tem duração inferior a uma safra agrícola. Portanto, este tipo de manejo adotado individualmente como prática mitigadora da compactação do solo, tende a ser limitado. Quando possível, conjugar esta prática com o cultivo de diferentes espécies vegetais nas áreas agrícolas manejadas em plantio direto (SILVEIRA JUNIOR et al., 2012; VALICHESKI et al., 2012), para que os benefícios que ambos proporcionam no solo se complementem e persistam por mais tempo.

A utilização de plantas de cobertura com sistema radicular volumoso e agressivo, contribui para o condicionamento de um solo mais poroso, aumentando a macroporosidade e a infiltração de água até as camadas mais profundas, além dos benefícios de reciclagem de nutrientes, elevação de matéria orgânica no solo e controle de plantas daninhas (SEIDEL et al., 2015).

No sul do País, a aveia preta é uma espécie de planta de cobertura amplamente difundida entre os produtores rurais, principalmente pela facilidade na produção, da aquisição de sementes e implantação, e proporciona elevado rendimento de matéria seca para a cobertura do solo (DONEDA et al., 2012), apresentando grande potencial de utilização em áreas de plantio direto. O cultivo de aveia simultaneamente com outras espécies de plantas na mesma área de cultivo, principalmente espécies de leguminosas e crucíferas, propicia-se benefícios mútuos ao solo, produzindo-se uma cobertura morta mais eficiente na proteção do solo, pois a relação carbono/nitrogênio intermediária resultante destes cultivos, possibilitam uma lenta decomposição dos resíduos vegetais e proteção do solo contra a erosão, amplitude térmica e hídrica (SANCHEZ et al., 2012; SOUZA et al., 2013).

O cultivo de plantas da família *Poaceae* traz rápidos benefícios físicos ao solo, como o aumento da macroporosidade e diminuição da RP (SANCHEZ et al., 2014), em decorrência da maior densidade e comprimento radicular que estas espécies apresentam (FERREIRA; TAVARES; FERREIRA, 2010); ao passo que as plantas da família *Fabaceae*, com baixa relação carbono/nitrogênio, propiciam rápida disponibilidade de nutrientes a cultura em sucessão e maior estabilização dos agregados do solo (DONEDA et al., 2012). Já as plantas da família *Cruciferae*, principalmente o nabo forrageiro, consegue atingir profundidades maiores no solo com raízes de maiores diâmetros, favorecendo a porosidade do solo após decomposição das raízes, assim como a continuidade dos poros, e tem-se destacado como tolerante às condições restritivas impostas pela compactação do solo (VALICHESKI et al., 2012).

Nicoloso et al. (2008), cultivaram aveia preta solteira e o consórcio com nabo forrageiro num Latossolo Vermelho Distroférico e relataram que a produção de matéria seca no consórcio foi 89,4% superior ao cultivo solteiro de aveia, obtendo produção total de 7.880 kg ha⁻¹ de massa de matéria seca; incremento de produtividade de fitomassa também observado por Doneda et al. (2012) em outros consórcios entre plantas, como o centeio e a ervilha forrageira.

A combinação de gramíneas com a ervilha forrageira, planta de crescimento inicial rápido, que tem precocidade e uniformidade de desenvolvimento, garante supressão das plantas daninhas na área de cultivo (MATEUS; WUTKE, 2006), além da garantia de nitrogênio no sistema pela fixação biológica de nitrogênio (CARGNELUTTI FILHO et al., 2015).

Em contrapartida ao cultivo de espécies no outono/inverno sem retorno financeiro ao agricultor, o cultivo do trigo (*Triticum aestivum* L.) apresenta-se como ótima alternativa de renda para ser inserida no sistema de rotação de culturas nas áreas de SPD. A planta de trigo apresenta sistema radicular fasciculado e volumoso, resultando numa boa estratégia de manejo de descompactação do solo, contribuindo para a manutenção de uma maior porosidade de aeração e menor densidade do solo (KLEIN et al., 2008). Além disso, seu cultivo possibilita um aporte elevado de biomassa seca de palhas sobre o solo (SEIDEL et al., 2015; WROBEL et al., 2016), com elevada relação carbono/nitrogênio, garantindo prolongada cobertura do solo com palha.

A partir do exposto, este trabalho desenvolvido na Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) em parceria com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), teve como hipótese: o efeito do cultivo de plantas de cobertura é superior ao preparo reduzido do solo como prática mitigadora da compactação do solo, e estas práticas podem afetar a produtividade da soja cultivada em sucessão. Para avaliar essa hipótese, a dissertação foi dividida em dois capítulos com diferentes objetivos:

Capítulo I, intitulado de “Plantas de cobertura cultivadas em diferentes sistemas de manejo alteram as propriedades físicas de um Latossolo em seu primeiro ciclo de cultivo?”, teve como objetivo avaliar a condição física resultante do cultivo de plantas de cobertura cultivadas em plantio direto e preparo reduzido após período de quatro meses.

Capítulo II, intitulado de “Propriedades físicas do solo e produtividade da soja após cultivo de plantas de cobertura em diferentes sistemas de manejo”, teve como objetivo avaliar

o rendimento de grãos de soja cultivada em sucessão a plantas de cobertura em diferentes sistemas de manejo e as alterações físicas decorrentes no solo.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARATANI, R. G. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 677-687, 2009.

BEULTER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BLAINSKI, E. et al. Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 79-87, 2012.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 789-796, 2005.

CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Tamanho de parcela e número de repetições em aveia preta. **Ciência Rural**, v. 45, n. 7, p. 1174-1182, 2015.

CHIG, L. A.; OLIVEIRA, E. F. DE; CRESTANI, A. B. Zonas de Manejo da Compactação do Solo Areas of Management of Soil Compaction. **Uniciências**, v. 18, n. 2, p. 85-90, 2014.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Décimo primeiro levantamento/Agosto 2017, safra 2016/2017. Brasília, v. 4, n. 11, p. 1-171, 2017.

DONEDA, A. et al. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1714-1723, 2012.

DRESCHER, M. S. **Efeito residual de intervenções mecânicas para descompactação do solo manejado sob sistema plantio direto**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

DRESCHER, M. S. et al. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1836-1844, 2012.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016.

ESPÍNDOLA, C. J.; CUNHA, R. C. C. A dinâmica geoeconômica recente da cadeia produtiva da soja no Brasil e no mundo. **GeoTexto**, v. 11, n. 1, p. 217-238, 2015.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES, J.; FERREIRA, V. M. Effects of pasture system management on physical properties. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

FERRERAS, L. A. et al. Effects of no tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. **Soil & Tillage Research**, v. 54, n. 1-2, p. 31-39, 2000.

FOLONI, J. SALVADOR S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. DE. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

GENRO JUNIOR, S. A. et al. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, v. 39, n. 1, p. 65-73, 2009.

GIRARDELLO, V. C. **Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto submetido à escarificação de sítio específico e o rendimento da soja**. 2010. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

GUARIZ, H. R. et al. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril de 2009, INPE, p. 7709-7716.

INAGAKI, T. M. et al. Macroagregados como indicadores de qualidade em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 151, p. 4-9, 2016.

JIMENEZ, R. L. et al. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 116-121, 2008.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, 2009.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

LANZANOVA, M. E. et al. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1333-1342, 2010.

LIMA, R. P. DE; LEÓN, M. J. DE; SILVA, A. R. DA. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 16-20, 2013.

MATEUS, G. V.; WUTKE, E. B. Espécies de leguminosas utilizadas como adubos verdes. **Pesquisa & Tecnologia**. v. 3, n. 1, p. 1-15, 2006.

MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1197-1206, 2011.

MEDEIROS, A. R. et al. Avaliação da compactação do solo por meio de um ensaio oedométrico. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 3, p. 09-22, 2015.

MENDES, M. C. et al. Biorregulador aplicado em diferentes estádios fenológicos na cultura do trigo. **Revista Agro@mbiente On-Line**, v. 9, n. 4, p. 476-480, 2015.

MOTTIN, M. C. **Efeito de plantas de cobertura cultivadas no inverno nas propriedades físicas do solo e na produtividade de soja e milho em sucessão**. 2016. 64 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, M. C. Rondon, 2016.

NICOLOSO, R. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1723-1734, 2008.

PIRES, F. R. et al. Manejo de plantas de cobertura antecessoras à cultura da soja em plantio direto. **Revista Ceres**, v. 55, n. 2, p. 94-101, 2008.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SANCHEZ, E. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista Magistra**, v. 26, n. 3, p. 266-271, 2014.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Revista Ciência Rural**, v. 39, p. 58-64, 2009.

SEIDEL, E. P. et al. Produção de matéria seca e propriedades físicas do solo na consorciação milho e braquiária. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 1, p. 18-24, 2015.

SEIDEL, E. P. et al. Evaluation of aggregate distribution and selected soil physical properties under maize-jack bean intercropping and gypsum rates. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 14, p. 1209-1216, 2017.

SEKI, A. S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015.

SILVA, S. G. C. **Variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**. 2011. 65 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2011.

SILVA, S. R.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 842-847, 2006.

SILVA, A. C. da; LIMA, É. P. C. DE; BATISTA, H. R. A importância da Soja para o Agronegócio Brasileiro: Uma análise sob o enfoque da produção, emprego e exportação. **V Encontro De Economia Catarinense**, 2011. Disponível em: <http://www.apec.unesc.net/V_EEC/sesoes_tematicas/Economia%20rural%20e%20agricultura>. Acesso em: 21 out. 2017.

SILVEIRA JUNIOR, S. D. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1854-1867, 2012.

SOUZA, M. et al. Matéria seca de plantas de cobertura, produção de cebola e atributos químicos do solo em sistema plantio direto agroecológico. **Ciência rural**, v. 43, n. 1, p. 21-27, 2013.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 963-973, 2008.

USDA. USDA. UNITED STATES. Department of Agriculture. **World Agricultural Production**. 2017. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/worldag-production/worldag-production-08-10-2017.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2017.

USDA. UNITED STATES. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. USDA. UNITED STATES. Department of Agriculture. **Agricultural Trade**. 2017. Disponível em: <<http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/AES/AES-08-30-2017.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2017.

VALICHESKI, R. R. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 9, p. 969-977, 2012.

WROBEL F. L. et al. Doses de nitrogênio sobre produtividade e aspectos nutricionais de grãos e palha de trigo duplo propósito. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 14, p. 27-35, 2016.

3 CAPÍTULO I: PLANTAS DE COBERTURA CULTIVADAS EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO ALTERAM AS PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO EM SEU PRIMEIRO CICLO DE CULTIVO?

3.1 RESUMO

Várias são as maneiras possíveis de se trabalhar o solo para melhorar suas características físicas, amenizando os efeitos prejudiciais da compactação e aumentando a capacidade e eficiência de armazenamento de água no solo. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de plantas de cobertura cultivadas em sistema de preparo reduzido e de plantio direto, nas propriedades físicas do solo. O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná em Entre Rios do Oeste, em delineamento de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas principais foram alocados dois sistemas de manejo: plantio direto e preparo reduzido do solo com o uso de escarificador de hastes. Nas subparcelas foram cultivadas três diferentes plantas de cobertura: trigo, consórcio de ervilha forrageira com aveia preta e o consórcio de aveia preta com nabo forrageiro. Após manejo químico e mecânico das plantas de cobertura, foram avaliadas a porosidade e densidade do solo, estabilidade dos agregados via úmida e resistência do solo à penetração. O preparo reduzido com escarificador de hastes foi eficiente para descompactar o solo da unidade experimental, promovendo incremento de 57,1% de macroporosidade na superfície do solo e diminuição da densidade e resistência a penetração. As plantas de cobertura utilizadas nesse experimento proporcionaram incremento de 33,3 e 60,0% de macroporosidade nas profundidades de 0,0 a 0,10 e 0,11 a 0,20 m, respectivamente, e contribuíram para a diminuição de 50,8% na resistência a penetração da camada superficial do solo. Foi observado que o consórcio de ervilha forrageira com aveia preta e aveia preta com nabo forrageiro foi mais eficiente para aumentar a macroporosidade do solo. A escarificação mecânica e biológica no solo foram satisfatórias para mitigação da compactação do solo presente até a camada de 0,30 m de profundidade.

Palavras-chave: adubação verde; cultivo mínimo; densidade do solo; plantio direto; resistência à penetração.

3.2 ABSTRACT

There are several possible ways of working the soil to improve its physical characteristics, mitigating the damaging effects of compaction and increasing the capacity and efficiency of water storage in it. In this context, the objective of this research was to assess the effect of cover crops grown in reduced tillage and no-tillage systems on soil physical properties. The experiment was conducted at State University of Western Paraná's Experimental Station, Entre Rios do Oeste, in a randomized block design, with a subdivided plot scheme and four replications. In the main plots, two farming systems were allocated: no-tillage and reduced tillage with chisel plow. In the subplots, three different cover crops were grown: wheat, forage pea consortium with black oats, and black oats consortium with forage turnip. After chemical and mechanical handling of the cover plants, soil porosity and density, wet aggregate stability and soil penetration resistance were assessed. Reduced tillage with chisel plow was efficient to loosen the soil of the experimental unit, promoting a 57.1% increase in macroporosity at the soil surface and a decrease in density and penetration resistance. The cover plants used in this experiment provided an increase of 33.3 and 60.0% in macroporosity at the depths of 0.0 to 0.10 and 0.11 to 0.20 m, respectively, and contributed to a decrease of 50.8% in the penetration resistance of the soil surface. The forage pea consortium with black oats, and the black oats consortium with forage turnip were more efficient to increase soil macroporosity. Mechanical and biological scarification was satisfactory to mitigate soil compaction until the layer of 0.30 m of depth.

Keywords: green manure; minimum tillage; soil density; no-tillage farming; penetration resistance.

3.3 INTRODUÇÃO

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento do Brasil (CONAB, 2017), a produção brasileira de grãos ocupa uma área de 60,7 milhões de hectares, dos quais, 35 milhões de hectares em 2014 eram áreas agrícolas manejadas sob sistema plantio direto (SPD) (FEBRAPDP, 2015). Atualmente, podemos considerar que este manejo do solo predomina em mais de 80% das áreas agrícolas brasileiras (INAGAKI et al., 2016). No estado do Paraná, mais de 91% das áreas agrícolas são manejadas sob SPD, aproximadamente 5.319.966 hectares

(FEBRAPDP, 2015). Nestas áreas há ocorrência de consideráveis alterações nas propriedades físicas e químicas do solo, como o aumento da compactação na profundidade entre 0,07 a 0,15 m, como observado por Secco et al. (2009) e Spera et al. (2011).

A compactação do solo é considerada uma das principais ameaças a manutenção da qualidade do solo e quando associada a adversidades climáticas, resulta em decréscimos de produtividade em áreas agrícolas. Portanto, entender como esse processo é constituído e buscar alternativas para mitigar seus efeitos, devem ser alvo de estudos em escala global (DRESCHER et al., 2016).

Na região Oeste do Paraná, a prática mecânica da escarificação do solo com escarificadores de hastes tem sido uma prática adotada por alguns agricultores para amenizar a compactação do solo em áreas consolidadas de plantio direto, a fim de reduzir a densidade do solo, a resistência à penetração e aumentar a porosidade de aeração do solo. Porém, esse efeito persiste por pouco tempo (NICOLOSO et al., 2008); e nem sempre favorece o aumento da produtividade da cultura (KLEIN; CAMARA, 2007; MAHL et al., 2008; DRESCHER et al., 2012).

O preparo reduzido do solo (ASAE, 2005), como o realizado com escarificadores de hastes, reduz as operações agrícolas, quando comparado ao preparo convencional, resultando em menor incorporação de resíduos vegetais e inversão do solo, menor custo do preparo, e redução das perdas de solo e água por erosão (CARVALHO FILHO et al., 2007). Porém, esta prática de manejo quando comparada ao SPD, acelera as perdas de carbono do solo, resultante da decomposição da matéria orgânica (ROSSET et al., 2014).

Outra alternativa viável e eficaz para modificar as propriedades físicas e químicas do solo é a adição de resíduos orgânicos (SEIDEL et al., 2015), através da rotação de culturas que proporciona boa cobertura morta sobre o solo. Considerado como prática essencial para consolidação do SPD (MOURA et al., 2012), espécies de plantas como a crotalária, feijão-deporco e milho modificam a estrutura do solo após seu cultivo, proporcionando aumentos no diâmetro médio geométrico dos agregados do solo e reduzindo a resistência do solo à penetração (CARDOSO et al., 2013).

Maiores evidências nas alterações das propriedades físicas e químicas do solo tem se observado com o cultivo de diferentes famílias de plantas de cobertura em consórcio, fato ligado a atuação de diferentes sistemas radiculares sobre o solo (DONEDA et al., 2012; SANCHEZ et al., 2014), bem como da decomposição dos resíduos vegetais que atuam na agregação do solo (SEIDEL et al., 2017). As espécies da família *Poaceae* são eficientes em

umentar e manter a estabilidade de agregados do solo e as plantas da família *Fabaceae* em incrementar nitrogênio ao solo (LOSS et al., 2015), proporcionando uma cobertura com relação carbono/nitrogênio intermediária no solo.

Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de plantas de cobertura cultivadas em sistema de preparo reduzido e plantio direto, nas propriedades físicas do solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 Localização, clima e solo da área de estudo

O trabalho foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizada em Entre Rios do Oeste, Paraná, Brasil (24° 68' S e 54° 28' W), a 244 metros de altitude em relação ao nível do mar. O clima, de acordo com a classificação de Koppen, é do tipo subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com precipitação média anual de 1600-1800 milímetros (CAVIGLIONE et al., 2000).

A área do estudo foi conduzida por mais de 14 anos em SPD, com a seguinte rotação de culturas: milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.), no período primavera/verão; e trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia-preta (*Avena strigosa* S.) e milho (*Zea mays* L.) no período outono/inverno.

Antes da instalação do experimento, uma amostra de solo da camada de 0,0 a 0,20 m foi coletada para caracterização granulométrica e química, com os seguintes resultados: pH em água de 5,79, teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} de 6,06; 3,05; 1,42 e 0,00 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente; 13,92 mg dm^{-3} de P, saturação por bases de 75% e teor de matéria orgânica de 19,14 g dm^{-3} . Quanto à composição granulométrica, o solo possui 525, 400 e 75 g kg^{-1} de, respectivamente, argila, silte e areia, sendo classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico típico, textura argilosa segundo metodologia de Santos et al. (2014).

Uma amostragem e análise prévia das propriedades físicas do solo até a profundidade de 0,40 m realizada na área experimental é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de porosidade (macro, micro e total), relação de macroporos/volume total de poros (MA/VTP), densidade do solo (Ds) e resistência à penetração (RP) da área experimental, determinada antes da implantação do experimento

Profundidade (m)	Porosidade (m ³ m ⁻³) ¹			Relação MA/VTP	Ds ¹ Mg m ⁻³	RP ² MPa
	Macro	Micro	Total			
0,00 - 0,10	0,07	0,43	0,50	0,14	1,81	1,81
0,11 - 0,20	0,05	0,42	0,47	0,11	2,37	2,37
0,21 - 0,30	0,05	0,43	0,48	0,10	2,03	2,03
0,31 - 0,40	0,06	0,44	0,50	0,12	1,54	1,59

¹Média de 8 pontos amostrais determinados em toda área experimental. ²Média de 24 pontos amostrais determinados em toda área experimental com 0,25; 0,25; 0,29 e 0,29 g g⁻¹ de umidade no solo na profundidade de 0,0-0,10; 0,11-0,20; 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m, respectivamente.

De acordo com os resultados encontrados para porosidade e densidade do solo e valores de resistência do solo a penetração, aliado ao histórico de manejo da área experimental, este solo teve indicativo de compactação, sendo mais evidente entre as profundidades de 0,11 a 0,30 m. A baixa macroporosidade verificada pode trazer problemas relacionados a deficiência de aeração as raízes das plantas e limitação de crescimento radicular em profundidade em decorrência dos altos valores de resistência do solo a penetração (RP) (SANCHEZ et al., 2014).

3.4.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados com arranjo em parcelas subdivididas, em faixas com quatro repetições.

As parcelas principais foram caracterizadas pelo plantio direto e pelo preparo reduzido do solo, manejo realizado com escarificador mecânico, modelo SPDA, montado, equipado com sete hastes, espaçadas a 375 mm, ponteiros de 75 mm de largura, conjugado com discos de corte na frente das hastes e rolo destorroador/nivelador na parte traseira do equipamento. A escarificação mecânica foi realizada até a profundidade de 0,30 m e não necessitou de operação de gradagem subsequente.

Os tratamentos das subparcelas constaram do cultivo de diferentes espécies vegetais com o objetivo de serem utilizadas como plantas de cobertura: trigo (*Triticum aestivum* L.), consórcio de ervilha forrageira com aveia preta (*Pisum sativum* L. e *Avena strigosa* S., respectivamente) e o consórcio de aveia preta com nabo forrageiro (*Avena strigosa* S. e *Raphanus sativus* L., respectivamente).

A semeadura das espécies vegetais foi realizada com uma semeadora-adubadora de precisão da marca Semeato, modelo SHM 11/13 com linhas espaçadas a 0,17 m, utilizando taxa de semeadura de 132 kg ha⁻¹ de semente de trigo da cultivar CD 150; para o consórcio de

ervilha forrageira (cultivar IAPAR 83) com aveia preta (EMBRAPA 139) utilizou-se 25 e 30 kg ha⁻¹ de sementes, respectivamente; e para se estabelecer o consórcio de aveia preta (cultivar EMBRAPA 139) com nabo forrageiro (cultivar IPR 116) utilizou-se 30 e 5 kg ha⁻¹ de sementes, respectivamente.

Conforme recomendação de adubação com base na análise de solo para a cultura do trigo, padronizou-se a dose de 250 kg ha⁻¹ do fertilizante 10-15-15 (N-P₂O₅-K₂O) para todos os tratamentos. Cada subparcela possuía área total de 210 m² (14 m de largura por 15 m de comprimento). Os tratamentos fitossanitários foram realizados conforme necessidade e seguindo o manual de informações técnicas para trigo e triticale (CUNHA; CAIERÃO, 2014).

Transcorridos cento e vinte dias após a semeadura das plantas, foi realizada a dessecação química em área total com 1080 g ha⁻¹ de equivalente ácido de herbicida glifosato, e posteriormente verificou-se a necessidade de realizar o manejo mecânico das plantas, sendo roçadas rente ao chão com auxílio de roçadeira com uma lâmina, montada e tracionada por trator.

3.4.3 Avaliações das propriedades físicas do solo

Após manejo das plantas de cobertura foram coletadas quatro amostras indeformadas de solo (anéis volumétricos de 50 cm³) por tratamento, nas camadas de 0,0-0,10; 0,11-0,20; 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m de profundidade para determinação da macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, seguindo-se a metodologia proposta por Donagema et al. (2011). A partir dos dados da porosidade total, a proporção macroporosidade/volume total de poros (MA/VTP) foi também calculada (TAYLOR; ASHCROFT, 1972).

O fracionamento e a estabilidade dos agregados via úmida foram determinados de acordo com o método descrito por Kemper & Chepil (1965), em agitador mecânico tipo Yoder (YOODER, 1936), nas camadas de solo de 0,0-0,20 e 0,21-0,40 m. O conjunto de peneiras utilizadas no tamizamento úmido foram 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,105 mm de abertura de malha e com a massa de agregados retidas nas peneiras, calcularam-se o diâmetro médio ponderado (KIEHL, 1979), o diâmetro médio geométrico (KEMPER; ROSENAU, 1986) e o índice de estabilidade dos agregados (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998). Os cálculos de fracionamento e estabilidade dos agregados foram realizados conforme as equações que seguem:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

$$DMG = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_j \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_j} \right] \quad (2)$$

$$IAE = \frac{\text{peso da amostra seca} - \text{wp25} - \text{areia}}{\text{Peso da amostra} - \text{areia}} 100 \quad (3)$$

Onde:

DMP: diâmetro médio ponderado (mm);

DMG: diâmetro médio geométrico (mm);

IAE: Índice de estabilidade de agregados (%);

w_i = proporção de cada classe de agregados em relação ao total;

x_i = diâmetro médio de cada classe de agregados;

w_j = peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio x_i ;

wp25 = peso dos agregados <0,25 mm (g);

areia = peso de partículas de diâmetro entre 2,0 – 0,053 mm (g).

A determinação da resistência mecânica do solo à penetração foi realizada a campo, em solo com 0,27 g g⁻¹ de água, mediante uso de um penetrômetro digital da marca Falker[®] modelo PLG 1020. Considerou-se como unidade observacional, cinco pontos amostrais por tratamento, composta pela média aritmética dos valores obtidos pelo penetrômetro, a cada 0,025 m de profundidade, em um perfil total de 0,40 m. Os valores de RP foram transformados para a unidade de MPa.

3.4.4 Análise dos dados

Todos os dados do experimento foram submetidos à análise de variância (ANOVA), por meio do teste F (Fisher) a 5 % de probabilidade, e para a comparação das médias foi utilizado o teste Tukey a 5 % de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas no programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não foi observado a interação entre tratamentos na análise de variância. O preparo reduzido do solo resultou em aumento da macroporosidade e redução da densidade do solo nas camadas de 0,0 a 0,10 m e 0,0 a 0,20 m, respectivamente (Tabela 2), em decorrência da

mobilização de parte do solo pelas hastas escarificadoras que ocasionaram aumento da macroporosidade, resultando na diminuição da densidade do solo, corroborando com os resultados encontrados por Secco et al. (2005) e Nicoloso et al. (2008).

Tabela 2. Valores médios de macro e microporosidade, porosidade total (Pt), relação de macroporos/volume total de poros (MA/VTP) e densidade do solo (Ds) avaliados nas camadas de 0,0-0,10; 0,11-0,20; 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m após manejo das plantas de cobertura

Fator de variação	Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Relação MA/VTP	Ds Mg m^{-3}	Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Relação MA/VTP	Ds Mg m^{-3}
	Macro	Micro	Pt			Macro	Micro	Pt		
	0,0 - 0,10 m				0,11 - 0,20 m					
Sistema de Manejo										
Preparo reduzido	0,11a	0,42 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,21	1,26b	0,09 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,17	1,35b
Plantio direto	0,08b	0,44	0,52	0,15	1,41a	0,07	0,45	0,52	0,13	1,47a
CV %	17,35	4,93	2,91		7,52	21,92	5,60	5,67		5,40
Planta de cobertura										
Ervilha + Aveia	0,10a	0,43 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,19	1,28 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,15	1,43 ^{ns}
Aveia + Nabo	0,10a	0,43	0,53	0,19	1,34	0,08	0,44	0,52	0,15	1,41
Trigo	0,08b	0,43	0,51	0,16	1,38	0,08	0,44	0,52	0,15	1,38
CV %	10,31	8,55	7,85		10,59	18,60	6,08	5,91		5,28
	0,21 - 0,30 m				0,31 - 0,40 m					
Sistema de Manejo										
Preparo reduzido	0,07 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,14	1,43 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,12	1,41 ^{ns}
Plantio direto	0,06	0,46	0,52	0,12	1,44	0,07	0,45	0,52	0,13	1,38
CV %	24,35	5,23	1,49		4,27	16,84	2,77	4,40		4,37
Planta de cobertura										
Ervilha + Aveia	0,06 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,50 ^{ns}	0,12	1,42 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,13	1,42 ^{ns}
Aveia + Nabo	0,06	0,45	0,51	0,12	1,43	0,06	0,45	0,51	0,12	1,37
Trigo	0,06	0,45	0,51	0,12	1,44	0,07	0,46	0,53	0,13	1,40
CV %	10,24	3,77	2,17		2,67	23,60	1,76	4,09		3,55

^{ns}: Não significativo. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV: Coeficiente de variação.

As plantas de cobertura tiveram efeito também sobre a macroporosidade do solo, sendo que o consórcio de duas espécies vegetais de diferentes famílias e atuação de sistemas radiculares diferentes no solo, influenciou na criação, manutenção e quantidade de macroporos presentes na camada de 0,0-0,10 m de profundidade, resultado que também foi observado por Nicoloso et al. (2008). Nesta camada, os resultados para a macroporosidade foram maiores estatisticamente para os consórcios ($0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação ao cultivo do trigo solteiro ($0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Klein et al. (2008) verificaram que o cultivo do trigo contribuiu para a manutenção do efeito proporcionado pela escarificação mecânica, em diminuir a densidade e aumentar a macroporosidade do solo após sete meses do manejo no solo, mostrando ser eficiente também em promover melhorias físicas no solo.

Em valores absolutos, a escarificação mecânica do solo resultou em incremento de 57,1% de macroporosidade na superfície do solo em relação a observada na área experimental antes da implantação do experimento (Tabela 1), e de 80,0% na camada de 0,11 a 0,20 m. Com a escarificação biológica, houve incremento de 33,3 e 60,0% de macroporosidade nas camadas de 0,0 a 0,10 e 0,11 a 0,20 m, respectivamente. Não foram encontradas diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos nas demais camadas em decorrência da profundidade de atuação da haste escarificadora e a tendência de concentração do sistema radicular na camada superficial do solo.

A elevação da macroporosidade do solo faz-se necessário devido as restrições de trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, podendo limitar a presença de oxigênio para as raízes das plantas e para a macro e micro fauna do solo (KLEIN; CAMARA, 2007). Valores abaixo de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de macroporosidade no solo, pode ser indicativo para a ocorrência deste problema. Uma estratégia para aumentar a macroporosidade do solo, consiste no cultivo de espécies vegetais de interesse econômico ou não, que possua diferentes sistemas radiculares e capacidade de penetração e desenvolvimento no solo, permitindo que seja formado macroporos mais estáveis depois da decomposição das raízes das plantas (MAZURANA et al., 2011), e mesmo pela liberação de exsudatos das mesmas sobre os poros do solo (SEIDEL et al., 2015).

A macroporosidade mostrou-se ser o atributo mais sensível após intervenções externas no solo. A microporosidade e a porosidade total do solo não foram afetadas pelos sistemas de manejo do solo, bem como pelas plantas de cobertura nas camadas analisadas (Tabela 2).

Tanto na camada de 0,0-0,10 e 0,11-0,20 m, a densidade do solo foi maior no plantio direto em comparação ao preparo reduzido com o uso do escarificador de hastes (Tabela 2), corroborando com os resultados encontrados por Mazurana et al. (2011). Os valores encontrados de D_s no plantio direto foram 1,41 e 1,47 Mg m^{-3} nas camadas 0,0-0,10 e 0,11-0,20 m, respectivamente; entretanto, não podem ser considerados como fator impeditivo para o desenvolvimento radicular em profundidade e suficiente para promover decréscimos de produtividade das culturas comerciais (SECCO et al., 2009).

Houve diminuição de 13,7% na densidade do solo com a escarificação mecânica e 8,9% com a escarificação biológica na superfície do solo em relação a observada na área antes da implantação do experimento (Tabela 1). Para a camada de 0,11 a 0,20 m de profundidade, também ocorreu diminuição da densidade, 11,8 e 8,1% com a escarificação mecânica e biológica, respectivamente.

Na análise dos índices de agregação do solo nas camadas de 0,0-0,20 e 0,21-0,40 m, não foi constatado diferença estatística ($p < 0,05$) entre os tratamentos após o manejo das plantas de cobertura (Tabela 3). Esses índices de agregação são dependentes de vários fatores envolvidos no solo, destacando-se físicos, químicos, biológicos e antrópicos, sendo possível verificar alterações destes índices com o decorrer do tempo (TISDALL; OADES, 1982).

Tabela 3. Valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados (IAE) avaliados nas camadas de 0,0-0,20 e 0,21-0,40 m após manejo das plantas de cobertura

Fator de variação	DMP (mm)		DMG (mm)		IAE (%)	
	0,0 - 0,20 m	0,21 - 0,40 m	0,0 - 0,20 m	0,21 - 0,40 m	0,0 - 0,20 m	0,21 - 0,40 m
Sistema de Manejo						
Preparo reduzido	2,32 ^{ns}	1,71 ^{ns}	1,42 ^{ns}	1,07 ^{ns}	92,43 ^{ns}	91,27 ^{ns}
Plantio direto	2,27	1,80	1,57	1,13	92,98	90,12
CV %	20,34	7,64	9,37	14,05	2,55	6,01
Planta de cobertura						
Aveia + Nabo	2,22 ^{ns}	1,81 ^{ns}	1,48 ^{ns}	1,11 ^{ns}	92,50 ^{ns}	91,01 ^{ns}
Ervilha + Aveia	2,31	1,74	1,52	1,09	91,89	90,60
Trigo	2,35	1,72	1,49	1,10	93,72	90,48
CV %	9,05	12,85	15,61	15,94	3,28	2,28

^{ns}: não significativo. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). CV: Coeficiente de variação.

A prática de revolvimento do solo resulta na desagregação do mesmo, quebrando os agregados em partes não uniformes, influenciando na porosidade e na taxa de infiltração de água no solo (PAGLIARINI et al., 2012). Nas condições experimentais, o diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) dos agregados no tratamento com preparo reduzido do solo não se diferiu estatisticamente ($p < 0,05$) dos agregados do plantio direto na camada de 0,0-0,20 m e de 0,21-0,40 m.

Quando o solo é manejado em SPD, há uma tendência com o passar dos anos do aumento nos índices de DMP e DMG dos agregados do solo, como verificado para um Latossolo Vermelho por Rosset (2015), estando relacionado principalmente a solos ricos em diversidade biológica e de incremento contínuo de matéria orgânica (MATOS et al., 2008; LOSS et al., 2011; WENDLING et al., 2012).

O índice de estabilidade dos agregados (IAE) observados nas camadas analisadas foi em média 91,85% no preparo reduzido, e 91,55% no plantio direto. Este índice demonstra a alta estabilidade dos agregados devido as forças de adesão entre as partículas do solo, fortemente observado em Latossolos pela sua mineralogia (MADARI, 2004). Segundo Salton et al. (2008), o desenvolvimento e a atividade do sistema radicular das gramíneas e os microrganismos do

solo associados à ausência de revolvimento do solo, tendem a contribuir para formação de macroagregados estáveis e maiores.

Observou-se com o incremento da profundidade amostrada no solo, uma diminuição numérica nos índices de agregação, o que era de se esperar, pois a agregação está fortemente ligada ao teor de matéria orgânica do solo (Tabela 3). Portanto, resultados mais satisfatórios de agregação do solo e em profundidade poderão ser observados após a decomposição das plantas e mineralização da matéria orgânica do solo, que irá agir como agente cimentante na formação de agregados maiores (CARDOSO et al., 2013).

Os valores de resistência do solo à penetração nos diferentes sistemas de manejo do solo e nas espécies de plantas de cobertura, estão apresentados na Figura 1a e 1b, respectivamente, não sendo observada a interação entre tratamentos na análise de variância.

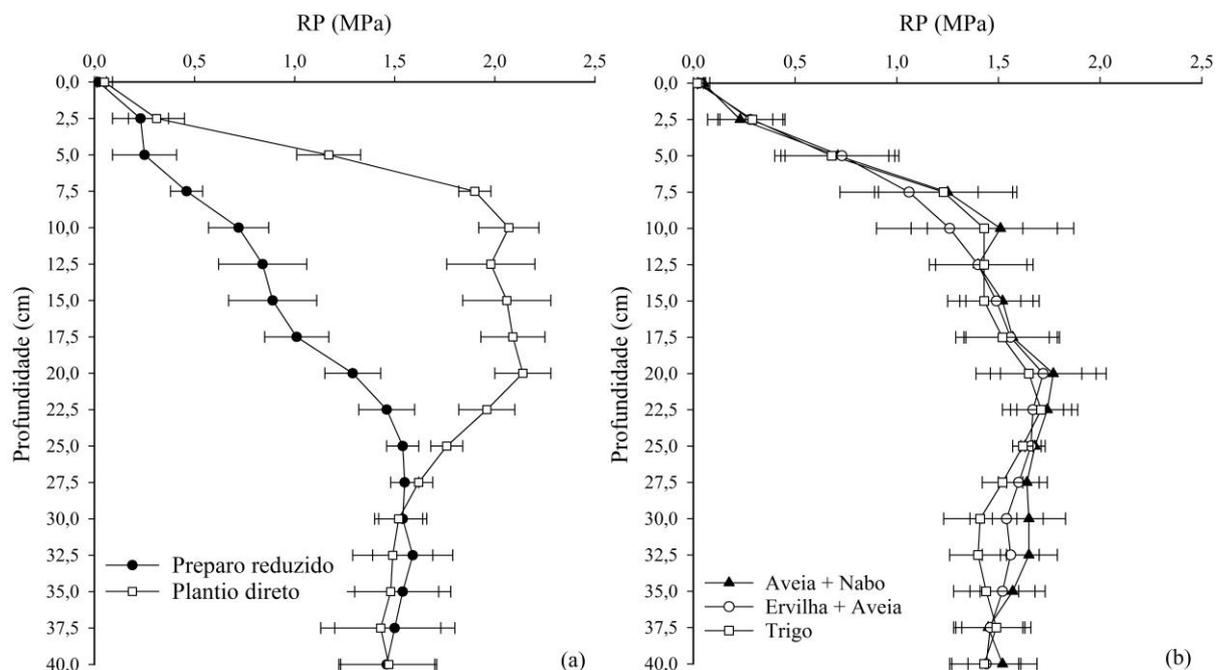


Figura 1. Resistência do solo à penetração em MPa, até a profundidade de 0,40 m, determinado após manejo das plantas de cobertura. A comparação entre tratamentos a cada 0,025 m foi realizada por meio da barra contendo o valor da diferença média significativa obtida através do teste Tukey 5%.

A resistência do solo à penetração na camada de 0,05 a 0,25 m no tratamento onde procedeu-se a escarificação mecânica (preparo reduzido) foi estatisticamente menor em relação ao tratamento plantio direto (Figura 1a), fato relacionado a atuação das hastes escarificadoras até a profundidade de 0,30 m, que promoveu aumento da porosidade total e redução da densidade do solo (Tabela 2). Foi observado valores para a profundidade de 0,05 m de 0,25 e 1,17 MPa para o preparo reduzido e plantio direto, respectivamente.

A escarificação mecânica proporcionou redução de 76,8% na resistência do solo a penetração na superfície (0,0-0,10 m) em relação a condição inicial do solo (Tabela 1). A diminuição da RP do solo em áreas cultivadas sob SPD onde realizou-se o preparo reduzido com escarificadores também foi observada para um Latossolo Vermelho (NICOLOSO et al. 2008) e Argissolo Vermelho-Amarelo (MAZURANA et al. 2011).

Observa-se que a RP obtida no plantio direto atingiu valores próximos, e em algumas profundidades até superiores a 2,0 MPa. Nas profundidades de 0,10 e 0,20 m, os valores foram de 2,07 e 2,14 MPa, respectivamente, e a Ds foi de 1,47 Mg m⁻³ nesta camada (Tabela 2). Estes valores são indicativos de uma camada de solo com alto grau de compactação, porém, não restritiva ao crescimento e desenvolvimento radicular das plantas (PIRES et al., 2008; DRESCHER et al., 2016).

Não houve diferença estatística entre as plantas de cobertura até a camada de 0,40 m de profundidade na avaliação da RP (Figura 1b), corroborando com os resultados encontrados por Sanchez et al. (2012). Esperava-se que os consórcios de espécies vegetais pudessem contribuir na diminuição dos valores de RP em profundidade quando comparado ao cultivo do trigo solteiro, pelos sistemas radiculares abundantes e vigorosos que apresentam, mas não se confirmou no presente estudo; ou o cultivo destas plantas de cobertura, somente num ciclo de cultivo, não foi suficiente para promoverem mudanças significativas na resistência do solo (REINERT et al., 2008).

A escarificação biológica no solo proporcionou reduções de 50,8 e de 35,0% da RP nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,11-0,20 m, em relação a condição física inicial do experimento (Tabela 1), destacando-se como aliada a práticas de mitigação da compactação do solo.

Cardoso et al. (2013), verificaram que a utilização das plantas de cobertura milheto, crotalária e feijão-de-porco, reduziram a resistência do solo à penetração na camada de 0,0-0,25 m em comparação a análise realizada anteriormente ao cultivo, em razão do melhor desenvolvimento do sistema radicular ao longo do ciclo da cultura. Portanto, após a decomposição das raízes, a tendência é ocorrer maior quantidade de bioporos no solo que participaram das trocas gasosas e permitiram o crescimento da raízes das plantas subsequentes, alterando assim também as propriedades físicas do solo (DEBIASI et al., 2010; SANCHEZ et al., 2012).

3.6 CONCLUSÕES

O preparo reduzido com escarificador de hastes foi eficiente para descompactar o solo, promovendo aumento da porosidade de aeração e diminuição da densidade e resistência a penetração.

As plantas de cobertura utilizadas nesse experimento proporcionaram valores desejáveis para a macroporosidade do solo, sendo observado que o consórcio entre duas espécies de famílias diferentes é mais eficiente para aumentar a porosidade de aeração do solo.

A escarificação mecânica e biológica no solo foram satisfatórias para mitigação da compactação do solo presente até a camada de 0,30 m de profundidade.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE. AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Terminology and definitions for soil tillage and soil-tool relationships. In: **ASAE Standards 2005**, (ASAE EP291.3), p. 129-132, 2005.

BORDIN, I. et al. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.

CARDOSO, D. P. et al. Espécies de plantas de cobertura no condicionamento químico e físico do solo. **Revista Brasileira de Ciência Agrárias**, v. 8, n. 3, p. 375-382, 2013.

CARVALHO FILHO, A. et al. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 229-237, 2007.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.

CAVIGLIONE, J. H. et al. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina, Instituto agrônomo do Paraná (IAPAR), 2000. CD- ROM.

CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Décimo primeiro levantamento/Agosto 2017, safra 2016/2017. Brasília, v. 4, n. 11, p. 1-171, 2017.

CUNHA, G. R. DA; CAIERÃO, E. Informações técnicas para Trigo e Triticale - safra 2015. In: **VIII Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale**. p. 229, 2015.

DEBIASI, H. et al. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.

DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 230 p, 2011.

DONEDA, A. et al. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1714-1723, 2012.

DRESCHER, M. S. et al. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1836-1844, 2012.

DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016.

FEBRAPDP, F. B. DE P. D. NA P. **Evolução da área cultivada no Sistema de Plantio Direto na palha - Brasil**. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/Ev_area_pd_brasil.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2016.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.

INAGAKI, T. M. et al. Macroagregados como indicadores de qualidade em sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v. 151, p. 4-9, 2016.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. cap. 9, p. 449-510.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap 17, p.425-443.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 263 p.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

LOSS, A. et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1212-1224, 2015.

MADARI, B. E. **Fracionamento de agregados: Procedimento para uma estimativa compartimentada do seqüestro de carbono no solo**. EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Comunicado Técnico 22, p. 1-10, 2004.

MAHL, D. et al. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Sci. Agron.**, v. 30, n. 1, p. 741-747, 2008.

MATOS, E. DA S. et al. Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 9, p. 1221-1230, 2008.

MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1197-1206, 2011.

MOURA, J. B. et al. Resistência a penetração do solo em pastagem cultivada com *Brachiaria Decumbens* sob aplicação de dejetos líquidos suínos e cama de frango. **Global Science and Technology**, v. 5, n. 3, p. 162-169, 2012.

NICOLOSO, R. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1723-1734, 2008.

PAGLIARINI, M. K.; MENDONÇA, V. Z. DE; ALVES, M. C. Distribuição de tamanho de agregados estáveis em água em solos de Selvíria-MS e Ilha Solteira-SP, Brasil. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 6, n. 1, p. 45-51, 2012.

PIRES, F. R. et al. Manejo de plantas de cobertura antecessoras à cultura da soja em plantio direto. **Revista Ceres**, v. 55, n. 2, p. 94-101, 2008.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSSET, J. S. et al. Carbon stock, chemical and physical properties of soils under management systems with different deployment times in western region of Paraná, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 6, p. 3053-3072, 2014.

ROSSET, J. S. **Caracterização da matéria orgânica, atributos químicos e físicos do solo sob diferentes sistemas de manejo na região Oeste do Paraná**. 2015. 94 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Mar. C. Rondon, 2015.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 11-21, 2008.

SANCHEZ, E. et al. Winter cover crops, plant biomass production and soil resistance. **Appl. Res. & Agrotec.**, v. 5, n. 3, p. 33-40, 2012.

SANCHEZ, E. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista Magistra**, v. 26, n. 3, p. 266-271, 2014.

SANTOS, H. G. DOS et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4a ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2014. 376 p.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Revista Ciência Rural**, v. 39, p. 58-64, 2009.

SEIDEL, E. P. et al. Produção de matéria seca e propriedades físicas do solo na consorciação milho e braquiária. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 1, p. 18-24, 2015.

SEIDEL, E. P. et al. Evaluation of aggregate distribution and selected soil physical properties under maize-jack bean intercropping and gypsum rates. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 14, p. 1209-1216, 2017.

SPERA, S. T. et al. Atributos químicos restritivos de Latossolo Vermelho distrófico e tipos de manejo de solo e rotação de culturas. **Revista Agrarian**, v. 4, n. 14, p. 324-334, 2011.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology**: the physics of irrigated and non-irrigated soils. San Francisco: W.H. Freeman, 1972. 532 p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

WENDLING, B. et al. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 256-265, 2012.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society Agronomy**, Madison, v. 28, n. 1, p. 337-351, 1936.

4 CAPÍTULO II: PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E PRODUTIVIDADE DA SOJA APÓS CULTIVO DE PLANTAS DE COBERTURA EM DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO

4.1 RESUMO

Em áreas agrícolas que estão compactadas, algumas práticas agrícolas são recomendadas para atenuar este problema, principalmente no período da entressafra, porém, seus efeitos sobre o rendimento de grãos da cultura sucessora ainda não são consistentes. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o rendimento de grãos da cultura da soja cultivada em sucessão a área manejada com escarificador e sem escarificação, aliado ao cultivo de plantas de cobertura; e as propriedades físicas do solo após a colheita da soja. O experimento foi conduzido na Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná em Entre Rios do Oeste, em delineamento experimental de blocos casualizados com arranjo de parcelas subdivididas com quatro repetições. As parcelas principais foram compostas por 2 tratamentos, caracterizados pelo plantio direto e pelo preparo reduzido do solo. Nas subparcelas foram cultivadas diferentes espécies de plantas de cobertura, sendo o cultivo do trigo, cultivo do consórcio de ervilha forrageira com aveia preta e consórcio de aveia preta com nabo forrageiro. Após o manejo das plantas de cobertura, foi semeada e conduzida a cultura da soja em toda a área experimental e ao final do seu ciclo avaliada a produtividade de grãos, e também as propriedades físicas do solo (densidade do solo, porosidade total, agregação do solo e resistência do solo a penetração). A estratégia de preparo reduzido com hastes escarificadoras para mitigar a compactação promoveu a melhoria da estrutura do solo após nove meses da operação na superfície, com o aumento da macroporosidade e diminuição da resistência a penetração, mas não foi capaz de promover melhorias em subsuperfície. O efeito proporcionado pelo preparo reduzido do solo com escarificador mecânico não alterou a produtividade de grãos da cultura da soja, comparativamente a área manejada sob plantio direto.

Palavras-chave: descompactação do solo; escarificação mecânica; *Glycine max*; qualidade física do solo.

4.2 ABSTRAT

In compacted agricultural areas, some farming practices are recommended to mitigate this problem, especially in the off-season, but their effects on the grain yield of the successor crop are still not consistent. Thus, the objective of this research was to assess the grain yield of soybean cultivated in succession in a scarified and an unscarified area, coupled with the cultivation of cover crops, in addition to assessing soil physical properties after soybean harvest. The experiment was conducted at State University of Western Paraná's Experimental Station, Entre Rios do Oeste, in an experimental design of randomized blocks, with subdivided plots and four replications. The main plots were composed of 2 treatments, characterized by no-tillage and reduced tillage. In the subplots, different species of cover crops were grown – wheat, forage pea consortium with black oats, and black oats consortium with forage turnip. After handling of the cover crops, the soybean crop was sown and managed throughout the experimental area, and, at the end of its cycle, the grain yield, as well as the physical properties of the soil (density, total porosity, aggregation and penetration resistance) were assessed. The reduced tillage strategy with chisel plow to mitigate compaction improved soil structure after nine months of operation in the surface, with increased macroporosity and decreased penetration resistance, but it was not able to promote subsurface improvements. The effect of reduced tillage with mechanical scarification did not change the grain yield of the soybean crop, comparatively to the no-tillage area.

Keywords: soil decompaction; mechanical scarification; Glycine max; soil physical quality.

4.3 INTRODUÇÃO

A busca por sistemas de manejo do solo conservacionistas envolvendo a rotação de culturas tem sido alvo de diversos estudos em que a principal preocupação é avaliar a qualidade física do solo, por que se ignorada, os decréscimos de produção agrícola, a degradação do solo e o aumento da suscetibilidade do solo a erosão serão cada vez mais acentuados (CANILLAS; SALOKHE, 2002; RICHART et al., 2005).

Nestes estudos, são avaliados os atributos físicos relacionados a aeração e armazenamento da água no solo, destacando-se a densidade do solo e porosidade (ARATANI et al., 2009), resistência do solo a penetração (SECCO et al., 2009; SEIDEL; REIS; MOTTIM, 2016), fracionamento e estabilidade de agregados do solo (WENDLING et al., 2012; SEIDEL et al., 2017), intervalo hídrico ótimo, taxa de infiltração de água e condutividade elétrica (GIRARDELLO et al., 2011; MAZURANA et al., 2011), e que tem levado a uma discussão sobre o uso e manejo atual das áreas agrícolas brasileiras.

Estes estudos vem se deparando com um problema que já estava presente nas área agrícolas, porém passou a ser mais relevante em função de causar quedas de produtividade das culturas comerciais (SEKI et al., 2015). A compactação do solo oriunda do inadequado processo de adoção e condução do sistema plantio direto pelos agricultores (DRESCHER et al., 2012).

A compactação do solo ocorre quando há alterações no arranjo das partículas constituintes do solo e, quando excessiva, proporciona um impedimento mecânico ao crescimento radicular, ao menor volume de solo explorado e menor absorção de água e nutrientes pelas plantas (GUIMARÃES; STONE; MOREIRA, 2002). Este problema está relacionado ao tráfego excessivo de máquinas e implementos nas áreas agrícolas (VEIGA et al., 2007), aliado a presença de maiores teores de umidade do solo, que propicia a formação de camadas compactadas (KLEIN et al., 2008).

Métodos mecânicos (escarificação ou subsolagem) tem sido associados pelos agricultores como estratégia para promover a descompactação do solo em áreas sob plantio direto (KLEIN et al., 2008; SILVA et al., 2012), trazendo benefícios imediatos ao solo como o aumento da macroporosidade e diminuição da resistência do solo a penetração (DRESCHER et al., 2016). Porém, esta metodologia além de ser onerosa, é realizada sem a verificação da camada de solo compactada, bem como o grau de compactação existente, por isso, normalmente não é observado aumento no rendimento de grãos das culturas (DEBIASI et al., 2010; DRESCHER et al., 2012).

Nicoloso et al. (2008) verificaram em experimento com plantas de cobertura que os maiores rendimentos de grãos de soja foram observados após o cultivo do consórcio de aveia preta com nabo forrageiro associado ao uso do escarificador; destacando a aptidão que estas plantas apresentaram em ampliar as melhorias das condições físicas do solo proporcionadas pela escarificação.

A rotação de culturas com espécies com elevada produção de fitomassa e sistema radicular abundante, com capacidade de crescerem em solo com alta resistência a penetração,

criando poros onde as raízes da cultura subsequente possam crescer, é uma alternativa para amenizar os problemas de compactação e melhorar a qualidade estrutural do solo (DEBIASI et al., 2010; SANCHEZ et al., 2012). Também são responsáveis pela manutenção da porosidade no solo, onde os exsudatos orgânicos liberados pelas raízes terão ação aglutinadora sobre as paredes dos poros, tornando-os mais rígidos e resistentes (CALONEGO; ROSOLEM, 2008). Os resíduos vegetais deixados pelas plantas de cobertura também colaboram com o incremento de matéria orgânica no solo, favorecendo a formação de agregados estáveis de maior tamanho, aumentando a aeração do solo, as trocas gasosas e a infiltração de água (ARATANI et al., 2009; SEIDEL et al., 2017).

Sanchez et al. (2014) concluíram que plantas de cobertura como aveia preta, azevém, nabo forrageiro e ervilhaca podem ser incluídas, sem prejuízos na produtividade da cultura da soja, num sistema de rotação com essa cultura, e ainda contribuir com a porosidade do solo.

Neste contexto, a proposta deste trabalho foi avaliar o rendimento da cultura da soja em sucessão a área manejada com escarificador mecânico e em SPD, aliado ao cultivo de plantas de cobertura, bem como as propriedades físicas após nove meses do manejo do solo.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1 Localização, clima e solo da área de estudo

O trabalho foi conduzido nos anos de 2016 e 2017 na Estação Experimental da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizada no município de Entre Rios do Oeste, Paraná, Brasil (24° 68' S e 54° 28' W), a 244 metros de altitude em relação ao nível do mar. O clima, conforme classificação de Köppen é do tipo subtropical úmido mesotérmico (Cfa), com verões de temperaturas médias superiores a 22 °C e invernos com temperaturas inferiores a 18°C e precipitação média anual de 1600 - 1800 milímetros (CAVIGLIONE et al., 2000).

A área do estudo foi conduzida por mais de 14 anos em SPD, com a seguinte rotação de culturas: milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.), no período primavera/verão; e trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia-preta (*Avena strigosa* S.) e milho (*Zea mays* L.) no período outono/inverno.

A análise química da amostra de solo coletada antes da instalação do experimento na profundidade de 0,0 a 0,20 m revelou pH em água de 5,79; teores de $\text{Ca}^{2+} = 6,06 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $\text{Mg}^{2+} = 3,05 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $\text{K}^+ = 1,42 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $\text{Al}^{3+} = 0,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $13,92 \text{ mg dm}^{-3}$ de P,

saturação por bases de 75% e teor de matéria orgânica de 19,14 g dm⁻³. Quanto à composição granulométrica, o solo possui 525 g kg⁻¹ de argila, 400 g kg⁻¹ de silte e 75 g kg⁻¹ de areia, sendo classificada como Latossolo Vermelho Eutroférico típico, textura argilosa segundo metodologia de Santos et al. (2014).

A distribuição da precipitação pluviométrica ocorrida durante o desenvolvimento da cultura da soja (safra 2016/17) foi regular, ocorrendo índices pluviométricos adequados ao desenvolvimento da cultura durante todo seu ciclo, principalmente no estágio vegetativo (Figura 1).

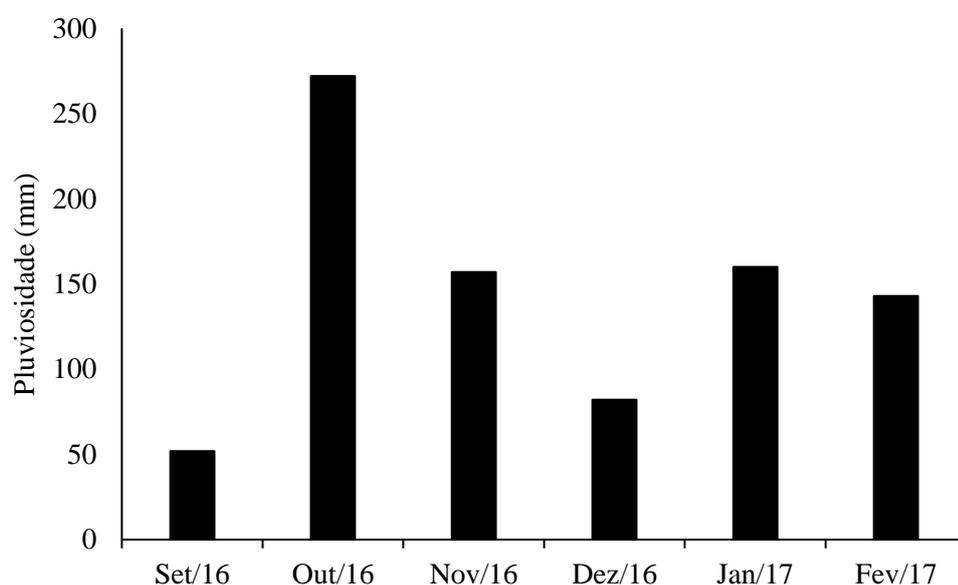


Figura 1. Regime pluviométrico ocorrido durante o desenvolvimento da cultura da soja em Entre Rios do Oeste - PR, Brasil. Fonte: Cooperativa Agroindustrial Copagril, unidade de Entre Rios do Oeste.

4.4.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental adotado foi de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas com arranjo em faixas com quatro repetições. Nas parcelas principais foram alocados dois sistemas de manejo do solo, o primeiro caracterizando o plantio direto e o segundo manejo com escarificação mecânica, caracterizando o preparo reduzido. Foi utilizado o escarificador modelo SPDA, montado, equipado com sete hastes, espaçadas a 375 mm, ponteiros de 75 mm de largura, conjugado com discos de corte na frente das hastes e rolo destorroador/nivelador na parte traseira do equipamento. A escarificação mecânica foi realizada até a profundidade de 0,30 m e não necessitou de operação de gradagem subsequente.

Cada subparcela era composta por 210 m² (14 m de largura por 15 m de comprimento), onde foram cultivadas diferentes espécies vegetais com o objetivo de serem utilizadas como plantas de cobertura: cultivo do trigo (132 kg ha⁻¹ do cultivar CD 150), cultivo do consórcio de ervilha forrageira com aveia preta (25 e 30 kg ha⁻¹ do cultivar IAPAR 83 e EMBRAPA 139, respectivamente), e o consórcio de aveia preta com nabo forrageiro (30 e 5 kg ha⁻¹ do cultivar EMBRAPA 139 e IPR 116, respectivamente). Estas plantas foram semeadas com auxílio de uma semeadora-adubadora de precisão para plantio direto e adubadas com 250 kg ha⁻¹ do fertilizante misto 10-15-15, N-P₂O₅-K₂O, respectivamente, recomendação de adubação com base na análise de solo para a cultura do trigo alcançar bom potencial produtivo. Os tratamentos fitossanitários foram realizados conforme necessidade e seguindo o manual de informações técnicas para trigo e triticale (CUNHA; CAIERÃO, 2014).

Transcorridos cento e vinte dias após a semeadura das plantas de cobertura, foi realizada a dessecação química em área total com 1080 g ha⁻¹ de equivalente ácido de herbicida glifosato, e posteriormente verificou-se a necessidade de realizar o manejo mecânico das plantas, sendo roçadas rente ao chão com auxílio de roçadeira hidráulica com uma lâmina, montada e tracionada por trator.

No dia 10 de outubro de 2016, a cultivar de soja NA 5909 RG foi semeada na área experimental por meio de semeadora-adubadora de fluxo contínuo para plantio direto, em espaçamento de 0,50 m, visando atingir 320.000 plantas ha⁻¹. As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* e a adubação de semeadura constou de 300 kg ha⁻¹ de um formulado 02-20-18, N-P₂O₅-K₂O, respectivamente. Os tratamentos fitossanitários da cultura foram realizados conforme necessidade e de acordo com o manual de produção de soja, elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (DALL'AGNOL; LIMA, 2011).

4.4.3 Avaliação da produtividade da soja

No estágio fenológico R8 da cultura da soja foi avaliada a produtividade de grãos pela debulha mecânica das plantas contidas em 8 m² de cada tratamento e com a massa de grãos obtidas, extrapolados os valores para kg ha⁻¹ (corrigido para 13% de umidade). Também foram avaliados a população de plantas e o número de vagens por planta em cada tratamento, e avaliado a massa de 1.000 grãos (média da massa de 8 subamostras de 100 grãos em balança de precisão, corrigida para 13 % de umidade).

4.4.4 Avaliações das propriedades físicas do solo

As avaliações das propriedades físicas do solo estão apresentadas no item 3.4.3 do Capítulo 1.

4.4.5 Análise dos dados

Todos os dados do experimento foram submetidos à análise de variância (ANOVA), por meio do teste F (Fisher) a 5 % de probabilidade, e para a comparação das médias foi utilizado o teste Tukey a 5 % de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas no programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação aos componentes de produção e a produtividade de grãos da cultura da soja (safra 2016/2017) em função do cultivo em sucessão a plantas de cobertura, não foi observada diferença significativa para os manejos adotados e nem para as diferentes plantas de cobertura cultivadas (Tabela 1). Também não foi observada interação significativa entre os tratamentos.

Tabela 1. Valores médios de população de plantas, número de vagens por planta, massa de mil grãos e produtividade de grãos da cultura da soja (safra 2016/2017) em função do sistema de preparo do solo e em sucessão a plantas de cobertura

Fator de variação	População (plantas/ha)	Nº de vagens/planta	Massa de mil grãos (g)	Produtividade de grãos (kg ha ⁻¹)
Sistema de Manejo				
Preparo reduzido	295.000,00a	61,38a	132,10a	4.215,52a
Plantio direto	315.000,00a	59,89a	129,52a	3.841,37a
CV %	16,13	11,34	3,52	9,58
DMS	63.906,08	8,93	5,98	501,30
Planta de cobertura				
Aveia + Nabo	302.500,00a	61,07a	134,13a	4.004,08a
Ervilha + Aveia	305.000,00a	60,70a	130,09a	4.012,82a
Trigo	307.500,00a	60,14a	128,17a	4.068,44a
CV %	9,67	11,91	3,00	6,53
DMS	45.218,78	11,07	6,01	403,33

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05). CV: Coeficiente de variação. DMS: diferença média significativa.

A distribuição regular do regime pluviométrico observado durante o desenvolvimento da cultura da soja (Figura 1), provavelmente amenizaram os reflexos da compactação do solo

sobre o rendimento da soja, obtendo-se rendimentos elevados, com média geral de 4029 kg ha⁻¹; sendo 8,3% acima da produtividade média da soja no Estado do PR na safra 2016/2017, e 19,9% acima da produtividade média da soja no País na safra 2016/2017 (CONAB, 2017).

Klein; Camara (2007) e Secco et al. (2009) também não verificaram incremento de produtividade de soja em solo escarificado. A grande quantidade de bioporos formados por microrganismos em solos manejados pelo SPD, onde estão interconectados e de maior diâmetro, propiciam maior condutividade da água e do ar no solo, compensando assim os valores de densidade do solo e resistência a penetração acima do recomendado, fato que pode explicar que muitas vezes a escarificação não promove aumento da produtividade em áreas de plantio direto (SILVA et al., 2012).

Em condições de adversidades climáticas, como um estresse hídrico durante a fase reprodutiva da cultura da soja, principalmente no início do florescimento, a produtividade de grãos da cultura da soja cultivada em SPD foi superior estatisticamente a produtividade observada no solo manejado com escarificação mecânica (ALBAN, 2014), em razão do SPD proporcionar maior capacidade de retenção de água ao longo do perfil, em função do acúmulo de matéria orgânica que este sistema permite no solo.

Resultado semelhante com o cultivo de plantas de cobertura sobre a produtividade de grãos da cultura da soja foi observado por Mottin (2016), cultivando aveia preta, braquiária, ervilha forrageira e tremoço em Latossolo Vermelho, não afetando o rendimento de grãos da cultura principal.

Debiasi et al. (2010) verificaram que a produtividade de grãos de milho e soja foram superiores após o cultivo em sucessão a plantas de cobertura de inverno (aveia preta e o consórcio de aveia preta com ervilhaca) em relação a área mantida em pousio, relacionando este resultado a uma possível redução nas perdas de água do solo pela cobertura morta, o mesmo relatado por Nicoloso et al. (2008), onde o consórcio de aveia preta com nabo forrageiro resultou em maior produtividade da soja em comparação ao uso da aveia em cultivo solteiro. Desta forma, estas plantas de cobertura podem ser inseridas num sistema de rotação de culturas sem comprometer a produtividade da cultura principal.

Analisando as propriedades físicas do solo determinadas após a colheita da soja, verificou-se diferenças significativas ($p < 0,05$) para a macroporosidade nas camadas de 0,0-0,10 e 0,11-0,20 m (Tabela 2). Nas duas camadas, a macroporosidade foi maior no preparo reduzido (0,09 m³ m⁻³), em comparação ao plantio direto (0,07 m³ m⁻³), demonstrando assim o efeito

benéfico da escarificação mecânica, sendo capaz de romper as camadas de solo e permitir o aumento do movimento de água e difusão de gases, mesmo após nove meses da operação.

Tabela 2. Valores médios de macro e microporosidade, porosidade total (Pt), relação de macroporos/volume total de poros (MA/VTP) e densidade do solo (Ds) avaliados nas camadas de 0,0-0,10, 0,11-0,20, 0,21-0,30 e 0,31-0,40 m após cultivo da soja (safra 2016/17)

Fator de variação	Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Relação MA/VTP	Ds Mg m^{-3}	Porosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Relação MA/VTP	Ds Mg m^{-3}
	Macro	Micro	Pt			Macro	Micro	Pt		
0,0 - 0,10 m						0,11 - 0,20 m				
Sistema de Manejo										
Preparo reduzido	0,09 ^a	0,44 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,17	1,36 ^{ns}	0,09 ^a	0,44 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,17	1,40 ^{ns}
Plantio direto	0,07 ^b	0,45	0,52	0,13	1,45	0,07 ^b	0,45	0,52	0,13	1,47
CV %	15,41	3,57	4,65		6,78	19,35	3,73	3,62		5,38
Planta de cobertura										
Ervilha + Aveia	0,09 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,17	1,35 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,15	1,43 ^{ns}
Aveia + Nabo	0,08	0,45	0,53	0,15	1,42	0,08	0,45	0,53	0,15	1,44
Trigo	0,08	0,44	0,52	0,15	1,44	0,08	0,44	0,52	0,15	1,42
CV %	17,54	4,07	2,64		6,84	9,36	4,30	5,03		1,35
0,21 - 0,30 m						0,31 - 0,40 m				
Sistema de Manejo										
Preparo reduzido	0,09 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,17	1,39 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,15	1,38 ^{ns}
Plantio direto	0,08	0,45	0,53	0,15	1,44	0,08	0,46	0,54	0,15	1,40
CV %	19,79	2,25	4,61		3,60	19,96	4,49	6,03		2,39
Planta de cobertura										
Ervilha + Aveia	0,08 ^{ns}	0,44 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,15	1,43 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,53 ^{ns}	0,15	1,38 ^{ns}
Aveia + Nabo	0,08	0,44	0,52	0,15	1,43	0,08	0,46	0,54	0,15	1,37
Trigo	0,09	0,45	0,54	0,17	1,39	0,07	0,47	0,54	0,13	1,42
CV %	8,74	1,73	2,28		7,12	8,48	3,20	3,10		4,46

^{ns}: Não significativo. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna em cada camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV: Coeficiente de variação.

Entretanto, estas práticas mitigadoras da compactação não resultaram em valores favoráveis a macroporosidade do solo até 0,40 m de profundidade. Os valores são inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e podem refletir em restrições na difusão do oxigênio da atmosfera as raízes das plantas, assim como outros gases (MAZURANA et al., 2011), podendo restringir o crescimento e desenvolvimento radicular e ainda resultar em problemas de infiltração de água no solo (ARATANI et al., 2009). Todavia, neste trabalho a condição física do solo não afetou a produtividade de grãos da cultura da soja (Tabela 1), que se manteve acima da média da região, em um ano agrícola com bom regime pluviométrico durante o desenvolvimento da cultura (Figura 1).

Observou-se que a macroporosidade é a propriedade mais sensível no solo, que sofre alterações após intervenções externas no solo. Os demais atributos físicos, microporosidade, porosidade total e densidade do solo não sofreram alterações nas avaliações realizadas após nove meses da implantação do experimento (Tabela 2), corroborando com os resultados

encontrados por Klein; Camara (2007) e Nicoloso et al. (2008). Francziskowski et al. (2017), constataram que o efeito do preparo do solo resultante do uso de escarificadores de hastes não persistiu nas propriedades físicas do solo após 18 meses do manejo. Estes resultados comprovam a limitada persistência do efeito do uso de escarificadores de hastes como alternativa de descompactação do solo e melhoria da qualidade física do solo, principalmente em solos de textura argilosa (DRESCHER et al., 2016).

Os valores encontrados de densidade do solo da superfície até a profundidade de 0,20 m, principalmente no sistema plantio direto, estão acima do considerado crítico ao desenvolvimento radicular das plantas em profundidade, de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ (SEIDEL et al., 2015). Porém, normalmente são encontrados maiores valores de densidade do solo neste sistema (ARATANI et al., 2009). A opção de utilização de escarificadores de hastes para minimizar este problema, refletiu na área após nove meses do manejo, de acordo com os valores encontrados abaixo do limite crítico para a densidade do solo (Tabela 2).

O consórcio entre as plantas de cobertura, que apresentam sistema radicular, morfologia e desenvolvimento diferenciados, não promoveram diferença significativa nas propriedades físicas do solo após nove meses do manejo em comparação ao cultivo do trigo solteiro (Tabela 2). Sabe-se que as raízes das plantas da família *Poaceae* apresentam maior densidade e distribuição mais uniforme do sistema radicular no solo, em relação as *Fabaceae*, que incrementam teores maiores de nitrogênio no solo (CALONEGO; ROSOLEM, 2008). Portanto, quando possível é interessante priorizar o cultivo em consórcio de plantas de cobertura para benefícios da porosidade de aeração do solo e resistência a penetração.

Na análise dos índices de agregação do solo nas camadas de 0,0-0,20 e 0,21-0,40 m, não foi constatada diferença estatística ($p < 0,05$) entre os tratamentos avaliados após cultivo da soja (Tabela 3). Sistemas de manejos como o preparo reduzido, aceleram o processo de oxidação da matéria orgânica do solo (ARATANI et al., 2009) e conseqüentemente, acarretam em destruição da estrutura do solo, tornando difícil a manutenção dos agregados de maior tamanho (PAGLIARINI; MENDONÇA; ALVES, 2012), o que não foi observado neste trabalho, de acordo com o diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico analisados. A matéria orgânica é o principal agente cimentante dos agregados do solo, os exsudados orgânicos liberados pelas raízes das plantas, a decomposição da massa de matéria seca das plantas de cobertura e o cultivo da soja contribuíram para a manutenção dos agregados do solo (CALONEGO; ROSOLEM, 2008; SEIDEL et al., 2017), não inferindo também no índice de estabilidade de agregados.

Tabela 3. Valores médios de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidades dos agregados (IAE) avaliados nas camadas de 0,0-0,20 e 0,21-0,40 m após cultivo da soja (safra 2016/17)

Fator de variação	DMP (mm)		DMG (mm)		IAE (%)	
	0,0 - 0,20 m	0,21 - 0,40 m	0,0 - 0,20 m	0,21 - 0,40 m	0,0 - 0,20 m	0,21 - 0,40 m
Sistema de Manejo						
Preparo reduzido	2,48 ^{ns}	2,00 ^{ns}	1,72 ^{ns}	1,26 ^{ns}	95,16 ^{ns}	92,13 ^{ns}
Plantio direto	2,52	2,15	1,61	1,43	94,27	92,92
CV %	6,91	6,74	9,20	17,57	2,29	4,54
Planta de cobertura						
Aveia + Nabo	2,37 ^{ns}	1,98 ^{ns}	1,55 ^{ns}	1,20 ^{ns}	94,21 ^{ns}	90,81 ^{ns}
Ervilha + Aveia	2,57	2,06	1,70	1,35	94,84	93,27
Trigo	2,57	2,17	1,74	1,48	95,08	93,50
CV %	13,74	12,81	16,43	16,30	1,46	2,58

^{ns} não significativo. Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). CV: Coeficiente de variação.

Wendling et al. (2012), verificaram reduções nos valores de DMG e DMP da camada de 0,0-0,10 para 0,10-0,20 m em áreas manejadas com pastagem, Pinus e Cerrado, relacionados a diminuição dos valores de carbono orgânico do solo em profundidade. Neste trabalho também foram encontrados reduções dos índices de agregação do solo em profundidades maiores, o que pode ser contornado ao longo do tempo pela inclusão de plantas de cobertura que proporcionam recuperações significativas dos estoques de matéria orgânica do solo, e com sistema radicular volumoso e profundo (SEIDEL et al., 2017).

Os valores de resistência do solo à penetração, nos dois sistemas de manejo do solo e nos cultivos das espécies de plantas de cobertura, são apresentados na Figura 1a e 1b, respectivamente, sendo avaliados após o cultivo da soja (safra 2016/2017). Não houve interação significativa entre os tratamentos avaliados.

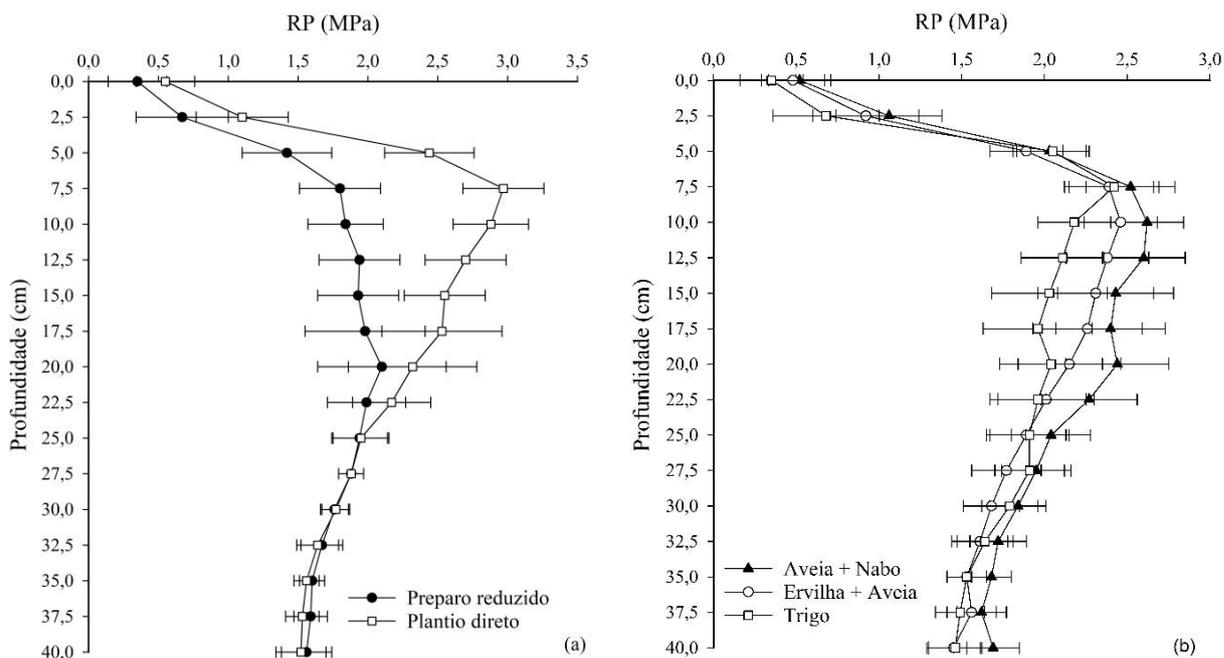


Figura 2. Resistência do solo à penetração em MPa, até a profundidade de 0,40 m, determinado após cultivo da soja em sucessão a plantas de cobertura. A comparação entre tratamentos a cada 0,025 m foi realizada por meio da barra contendo o valor da diferença média significativa obtida através do teste Tukey 5%.

O preparo reduzido do solo promoveu a redução dos valores de RP do solo nas profundidades de 0,05 até 0,15 m, em relação ao plantio direto. Em profundidades maiores, não foi observado tal efeito (Figura 1a). O revolvimento do solo proporcionado pelo preparo reduzido até a profundidade de 0,30 m demonstrou ser satisfatória para reduzir a RP na camada de 0,05 a 0,15 m, avaliadas após nove meses do manejo. Porém, os valores encontrados nesta camada de solo no preparo reduzido, estão próximos e/ou no limite crítico de 2,0 MPa para solos argilosos (SECCO et al., 2009), podendo resultar em restrições ao crescimento radicular das plantas, influenciar na percolação de água no solo e alterar a proporção de gases no solo (DRESCHER et al., 2012; SEIDEL; REIS; MOTTIM, 2016).

Valores superiores a 2 MPa também são encontrados no plantio direto até a profundidade de 0,25 m, atingindo valor máximo de 2,97 MPa na profundidade de 0,075 m, 2,88 e 2,70 MPa na camada de 0,10 e 0,125 m, respectivamente. Todavia, este valor crítico de RP depende da espécie de planta cultivada, sendo observado que de modo geral as gramíneas são mais suscetíveis aos efeitos negativos da compactação do solo, em comparação as leguminosas (SECCO et al., 2009). Estes mesmos autores verificaram que o rendimento de grãos de soja não diferiu entre três estados de compactação do solo avaliados e/ou parcela escarificada em dois tipos de Latossolos (LVd e LVdf), corroborando com os resultados encontrados neste presente estudo (Tabela 1), o que levanta em questão a real necessidade da

realização de práticas agrícolas que agridam a estrutura do solo para elevar os índices de produtividade das culturas comerciais.

Drescher et al. (2012) afirmam que mesmo que ocorra a presença de camadas de solo compactadas em subsuperfície, o sistema radicular das plantas podem obter água e nutrientes em quantidades satisfatórias na camada superficial do solo, proporcionando bons rendimentos de produtividade, como observados neste trabalho (Tabela 1), desde que o solo seja manejado seguindo-se as premissas básicas do SPD.

Não houve diferença estatística entre as plantas de cobertura cultivadas até a profundidade de 0,40 m na avaliação da RP após cultivo da soja (Figura 1b). O cultivo destas plantas de cobertura somente num ciclo de cultivo, não foi suficiente para promoverem mudanças significativas na resistência do solo (REINERT et al., 2008).

O cultivo de plantas de cobertura com elevada produção de massa de matéria seca (9.854,8; 9.726,8 e 9.076,7 kg ha⁻¹ para o consórcio de ervilha forrageira com aveia preta, consórcio de aveia preta com nabo forrageiro e o cultivo do trigo, respectivamente) contribui para formar bioporos estáveis no solo, que permanecem no solo mesmo que haja reconsolidação de sua estrutura (SANCHEZ et al., 2014; DRESCHER et al., 2016), e contribuem para elevar os teores de matéria orgânica do solo após sua decomposição, minimizando os efeitos da compactação (RICHART et al., 2005).

4.6 CONCLUSÕES

O efeito proporcionado pelo preparo reduzido do solo com escarificador mecânico não alterou a produtividade de grãos da cultura da soja, comparativamente a área manejada sob plantio direto.

A estratégia de preparo reduzido com hastes escarificadoras para mitigar a compactação promoveu a melhoria da estrutura do solo após nove meses da operação na superfície, com o aumento da macroporosidade e diminuição da resistência a penetração, mas não foi capaz de promover melhorias em subsuperfície.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBAN, A. A. **Produtividade da soja em função da adubação com cama de frango e manejos do solo**. 2014. 38 p. Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Eng. Agrônômica) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, M. C. Rondon, 2014.
- ARATANI, R. G. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 677-687, 2009.
- CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1399-1407, 2008.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998.
- CAVIGLIONE, J. H. et al. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina, Instituto agrônômico do Paraná (IAPAR), 2000. CD- ROM.
- CONAB: COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Nono levantamento/Junho 2017, safra 2016/2017. Brasília, v. 3, n. 9, p. 1-163, 2017.
- CUNHA, G. R. DA; CAIERÃO, E. Informações técnicas para Trigo e Triticale - safra 2015. In: **VIII Reunião da Comissão Brasileira de Pesquisa de Trigo e Triticale**. p. 229.
- DALL'AGNOL, V. F.; LIMA, A. B. A. **Tecnologias de produção de soja - Região central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja, Out. 2011. (Sistema de produção, nº 15).
- DEBIASI, H. et al. Produtividade de soja e milho após coberturas de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 6, p. 603-612, 2010.
- DONAGEMA, G. K. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 230 p, 2011.
- DRESCHER, M. S. et al. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1836-1844, 2012.
- DRESCHER, M. S. et al. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.
- FRANCZISKOWSKI, M. A. et al. Scarification and fertilization effect using poultry litter in porosity and soil resistance after soybean and corn growth. **Asian Academic Research Journal of Multidisciplinary**, v. 4, n. 12, p. 170-178, 2017.

GIRARDELLO, V. C. et al. Alterações nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob plantio direto induzidas por diferentes tipos de escarificadores e o rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2115-2126, 2011.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. cap. 9, p. 449-510.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analysis. Parte 1: Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap 17, p.425-443.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 263 p.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: Alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1197-1206, 2011.

MOTTIN, M. C. **Efeito de plantas de cobertura cultivadas no inverno nas propriedades físicas do solo e na produtividade de soja e milho em sucessão**. 2016. 64 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, M. C. Rondon, 2016.

NICOLOSO, R. S. et al. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1723-1734, 2008.

PAGLIARINI, M. K.; MENDONÇA, V. Z. de; ALVES, M. C. Distribuição de tamanho de agregados estáveis em água em solos de Selvíria-MS e Ilha Solteira-SP, Brasil. **Revista Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 6, n. 1, p. 45-51, 2012.

REINERT, D. J. et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, 2008.

RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

SANCHEZ, E. et al. Winter cover crops, plant biomass production and soil resistance. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, v. 5, n. 3, p. 33-40, 2012.

- SANCHEZ, E. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno. **Revista Magistra**, v. 26, n. 3, p. 266-271, 2014.
- SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4ª ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), 2014. 376 p.
- SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, v. 39, p. 58-64, 2009.
- SEIDEL, E. P. et al. Produção de matéria seca e propriedades físicas do solo na consorciação milho e braquiária. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 1, p. 18-24, 2015.
- SEIDEL, E. P. et al. Evaluation of aggregate distribution and selected soil physical properties under maize-jack bean intercropping and gypsum rates. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 14, p. 1209-1216, 2017.
- SEIDEL, E. P.; REIS, W. DOS; MOTTIM, M. C. Effects of surface application of gypsum in corn intercropped with jack bean (*Canavalia eusiformis*) with different soil penetration resistance. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 7, p. 985-989, 2016.
- SEKI, A. S. et al. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 460-468, 2015.
- SILVA, S. G. C. et al. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 547-555, 2012.
- TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology**: the physics of irrigated and non-irrigated soils. San Francisco: W.H. Freeman, 1972. 532 p.
- VEIGA, M. DA et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1-2, p. 104-113, 2007.
- WENDLING, B. et al. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 256-265, 2012.
- YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. **Journal American Society Agronomy**, Madison, v. 28, n. 1, p. 337-351, 1936.

5 CONCLUSÕES GERAIS

A compactação em áreas manejadas em plantio direto está associada a uma camada de solo específica, para o solo da unidade experimental está encontra-se entre 0,10 a 0,20 m de profundidade.

O preparo reduzido com escarificador de hastes foi eficiente para descompactar o solo da unidade experimental, promovendo melhorias na estrutura do solo, aumentando a macroporosidade, e diminuindo a densidade e resistência a penetração. Porém, esta prática tem potencial efêmero para mitigação deste problema, sendo que após nove meses da intervenção mecânica, somente ocorreu diminuição da resistência do solo a penetração.

As plantas de cobertura utilizadas nesse experimento, trigo, consórcio de ervilha forrageira com aveia preta e o consórcio de aveia preta com nabo forrageiro, proporcionaram melhorias na estrutura física do solo, contribuindo para a descompactação. Foi observado que o consórcio entre duas espécies de famílias diferentes é mais eficiente para aumentar a macroporosidade do solo.

O efeito proporcionado pelo preparo reduzido do solo com escarificador não alterou o rendimento de grãos da cultura da soja na safra agrícola 2016/2017, comparativamente a área manejada sob plantio direto. O mesmo efeito foi observado para o cultivo das diferentes plantas de cobertura utilizadas no experimento.

6 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A mitigação da compactação do solo nas áreas agrícolas manejadas sob plantio direto deve ser tratada como um conjunto de manejos agrícolas a serem praticados ao longo do tempo, optando-se em conjugar práticas agrícolas para maior eficiência dos manejos. Isto demanda estudos a fim de averiguar estas práticas ao longo do tempo e quais as mais eficientes em cada tipo e classe de solo de forma regionalizada.

A adoção de práticas agrícolas sustentáveis aliado a determinações físicas periódicas para alcançar valores desejáveis das propriedades físicas do solo, é a linha de pensamento a ser seguida para mitigação dos problemas relacionados a compactação.