

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós Graduação em Manejo e
Conservação do Solo e da Água



Dissertação

MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO

Márcio Renato Nunes

Pelotas, 2014

MÁRCIO RENATO NUNES

MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO

Dissertação apresentada ao programa de Pós Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Orientador: Professor Dr. Eloy Antonio Pauletto
Co-orientador: Professor Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto

Pelotas, 2014

MÁRCIO RENATO NUNES

MITIGAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO

Banca Examinadora:

Professor Dr. Eloy Antonio Pauletto)
Departamento de Solos – Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”

Pesquisador Dr. José Eloir Denardin
Manejo e Conservação do Solo e da Água - Embrapa Trigo

Professor Dr. Álvaro Pires da Silva
Departamento de Ciência do Solo - ESALQ - USP

Professor Dr. Pablo Miguel
Departamento de Solos - Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”

Aos meus pais, Artur Nunes e Jurilde Nunes,
às minhas irmãs, Renata e Luciamara
e à minha namorada Andréia,

DEDICO.

“A terra empobrecida faz a pessoa pobre e a pessoa “pobre” faz a terra empobrecer.”

Frase de Pare Lorentz, 1937.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Artur e Jurilde Nunes, que me mostraram a importância de crer em um Deus; de ser honesto e íntegro; de trabalhar em equipe, respeitando o próximo; de persistir e valorizar o que temos e o que somos. Sem estes ensinamentos não chegaria até aqui.

Ao professor Eloy Antonio Pauletto, que me orientou e repassou inúmeros conhecimentos durante a realização deste trabalho e, acima de tudo, pela sua amizade e grande ajuda desde o momento em que ingressei no curso de Agronomia da UFPel.

Ao pesquisador José Eloir Denardin, pelos inúmeros ensinamentos repassados, incentivo, amizade e convite para desenvolver este trabalho na área experimental da Embrapa Trigo.

Ao professor Luiz Fernando Spinelli Pinto, pela orientação, amizade e ensinamentos que a mim repassou durante o curso de mestrado e de Agronomia.

Ao pesquisador Antonio Faganello, da Embrapa Trigo, pela amizade e pelos inúmeros ensinamentos repassados.

Às minhas irmãs Luciamara e Luciane Renata, que embora tenham abdicado de estudar para que eu estudasse sempre me apoiaram e incentivaram a continuar lutando pelos meus ideais.

À minha namorada Andréia Ruas, pessoa compreensiva e amiga, que há mais de cinco anos me acompanha incentivando-me a continuar trabalhando, sobretudo nos momentos difíceis.

A todos os colegas pós-graduandos, do Departamento de Solos da UFPel, em especial a Marcos Campos do Vale, pelo auxílio nas análises estatísticas, e a Lizete Stumpf, pela troca de idéias a respeito da avaliação do sistema radicular de plantas.

Aos estagiários da Embrapa Trigo, Renan e Luan, que colaboraram nas coletas de solo e de raízes; a todos os estagiários do Departamento de Solos da UFPel que colaboraram nas análises laboratoriais, em especial a Tiago Scheumemann, Tiago Silva, João Pimentel e Jordano.

À professora Maria Cândida Moitinho Nunes, pelas valiosas contribuições e sugestões.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Solos da UFPel, pelos valiosos ensinamentos repassados, pelo auxílio prestado e pela amizade.

A todos os funcionários da Embrapa Trigo que contribuíram para que este trabalho se tornasse possível, em especial a Darci Veronese e Luiz Medeiros pela amizade e apoio durante as coletas de solo e do sistema radicular do milho, objeto de estudo desta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado.

OBRIGADO!!!

RESUMO

NUNES, Márcio Renato. **Mitigação da compactação do solo em plantio direto**. 2014. 125f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

No Brasil, aproximadamente 30 milhões de hectares são manejados sob plantio direto. Esta prática proporcionou benefícios econômicos e ambientais para o país. Entretanto, o solo sob plantio direto tem apresentado um problema generalizado, a compactação. Esta degradação física do solo, identificada na camada subsuperficial, aproximadamente entre 0,07 e 0,20 m, por confinar as raízes das culturas nos primeiros centímetros do perfil do solo, tem favorecido frustrações de safras agrícolas quando da ocorrência de pequenas estiagens. Desta forma, prejudica a economia do país. Assim, com o objetivo de gerar conhecimento pertinente à mitigação da degradação física do solo sob plantio direto, o que possibilitaria diminuir riscos de frustrações de safras em ano de estiagens, desenvolveram-se quatro estudos independentes, em experimento de campo na região do planalto do Estado do Rio Grande do Sul, buscando respostas para as seguintes questões: i) qual a persistência dos efeitos proporcionados pela escarificação do solo nos seus atributos físicos e no desenvolvimento das raízes das culturas, em áreas sob plantio direto? ii) semeadoras equipadas com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m) teriam potencial para aliviar a degradação física do solo e promover o aprofundamento do sistema radicular das plantas cultivadas no solo sob plantio direto? iii) qual o efeito do manejo mecânico da compactação do solo, na agregação da camada compactada sob plantio direto? iv) qual a contribuição da estratificação vertical dos atributos químicos na concentração do sistema radicular nos primeiros centímetros do perfil do solo? Os resultados obtidos indicam que: a escarificação tem efeitos positivos sobre atributos físicos do solo e no desenvolvimento de plantas, porém estes são efêmeros; a semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda tem potencial para aliviar a degradação física do solo sob plantio direto; dois anos depois da escarificação do solo e do início do emprego da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda, não se observa qualquer efeito significativo na agregação de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto; a estratificação vertical dos atributos químicos do solo em área sob plantio direto contribui muito pouco para o limitado desenvolvimento radicular das culturas na camada subsuperficial do solo, sendo a elevada resistência do solo à penetração o principal fator negativo para diminuir a taxa de crescimento de raízes nesta camada. Através destes estudos, percebeu-se o quão difícil será a tarefa de reabilitar a estrutura dos Latossolos e Nitossolos manejados sob plantio direto na região de clima subtropical úmido do Brasil. Este feito não será possível simplesmente com a adoção de métodos mecânicos.

Palavras chave: Sistema Radicular, Escarificação do Solo, Semeadora Para Plantio Direto, Agregação do Solo, Atributos Físicos e Químicos do Solo, Cultura do Milho.

ABSTRACT

NUNES, Márcio Renato. **Soil Compaction Mitigation in No-Till**. 2014. 125f. Dissertation (Master) - Post-Graduate Program in Soil and Water Management and Conservation. Pelotas Federal University, Pelotas.

In Brazil, approximately 30 million hectares are managed under no-tillage. This practice has provided economic and environmental benefits for the country; however, the soil under no-till has shown a widespread problem: soil compaction. This physical degradation, identified in the subsurface layer (between 0.07 to 0.20 m), by confining the roots of the crops in the first centimeters of the soil profile has favored reduced yields of agricultural crops in the event of short-term droughts, harming the country economy. Thus, in order to generate knowledge relevant to the mitigation of soil physical degradation under no-till, which would allow reducing the risks of the crop failure due to short-term droughts, four independent studies were performed, in field experiment in the plateau region of the state Rio Grande do Sul, seeking answers to the following questions: i.) which is the persistence of the effects provided by scarifying the soil on its physical properties and crops root development in areas under no-till? ii) seeders equipped with deep action shanks (17 cm) can potentially alleviate soil physical degradation and promote deeper crop root growth of plants in the soil under no till? iii) which is the effect of mechanical management of soil compaction in the compacted layer soil aggregation? iv) which is the contribution of the vertical stratification of the chemical attributes on concentration the root system in the first cm of the soil profile? The results indicate that: soil chiseling has positive effects on soil physical properties and the development of plants, nevertheless, these are ephemeral, lasting less than two years; seeders equipped with deep action shanks has the potential to alleviate the physical degradation of the soil under no-till; after two years managing the soil with seeder equipped with deep action shank and soil chiseling, it was not observed any significant effect on the soil aggregation; and, the vertical stratification of soil chemical properties in the area under tillage has very small contribution to the limited root development of crops in the subsurface soil layer, with high soil resistance to mechanical penetration being the main factor to decrease the roots growth rate in this layer. Through these studies it can be realized how difficult it is to rehabilitate the structure of the Oxisols managed under no-till in the Brazilian subtropical region. This cannot be achieved by simply adopting mechanical methods.

Key words: root system, soil chiseling, no-till seeders, soil aggregation, soil physical and chemical attributes, corn crops.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo geral	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL	15
3.1. Plantio direto e sistema plantio direto: conceitos	15
3.2. Plantio Direto na Região Subtropical Úmida do Brasil	15
3.3. Importância da estrutura do solo para a atividade agrícola	17
3.4. Desenvolvimento da estrutura do solo	18
3.4.1. Aproximação das partículas e formação dos agregados	18
3.4.2. Cimentação e estabilidade estrutural do solo	19
3.5. Estrutura dos Latossolos e Nitossolos da Região Subtropical Úmida do Brasil	20
3.6. Degradação estrutural de Latossolos e Nitossolos da Região Subtropical Úmida do Brasil	21
3.6.1. Sob preparo convencional do solo	21
3.6.2. Após a adoção do plantio direto	23
3.7. Algumas consequências da degradação estrutural do solo sob plantio direto	24
3.8. Manejo mecânico da compactação do solo sob plantio direto	28
3.8.1. Escarificação mecânica do solo	28
3.8.2. Semeadoras com hastes sulcadoras para ação profunda	29
3.9. Referências bibliográficas	30
4. ARTIGO I: Escarificação mecânica do solo sob plantio direto: efeitos efêmeros	38
4.1. Resumo	38
4.2. Introdução	38
4.3. Material e métodos	40
4.4. Resultados e discussão	47
4.5. Conclusões	55
4.6. Referências bibliográficas	55

5. ARTIGO II: Semeadora com haste sulcadora de ação profunda: potencial mitigador da degradação estrutural do solo sob plantio direto	59
5.1. Resumo	59
5.2. Introdução	59
5.3. Material e métodos	61
5.4. Resultados e discussão.....	68
5.5. Conclusões.....	78
5.6. Referências bibliográficas	79
6. ARTIGO III: Agregação de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto após o manejo mecânico da compactação do solo	83
6.1. Resumo	83
6.2. Introdução.....	83
6.3. Material e métodos	85
6.4. Resultados e discussão.....	89
6.5. Conclusões.....	98
6.6. Referências bibliográficas	98
7. ARTIGO IV: Atributos físicos e químicos do solo sob plantio direto e o desenvolvimento radicular de milho	102
7.1. Resumo	102
7.2. Introdução.....	102
7.3. Material e métodos	104
7.4. Resultados.....	105
7.5. Discussão.....	113
7.6. Conclusões.....	116
7.7. Referências bibliográficas	116
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
9. APÊNDICES	122

1. INTRODUÇÃO GERAL

A economia brasileira está baseada na produção agrícola. Em 2011, foi creditado ao agronegócio brasileiro 21,6% do PIB do Brasil, o que equivaleu a 917.654 milhões de reais (CEPEA-USP/CNA, 2013). O somatório da produção nacional de oleaginosas, leguminosas e cereais superou 161,9 milhões de toneladas, em 2012 (IBGE, 2013). Este montante foi colhido em uma área equivalente a 48,8 milhões de hectares, dos quais, mais de 30 milhões são manejados sob plantio direto (FEBRAPDP, 2013). Da produção supracitada, 38,6% tem origem na região Sul, e 15,8% no Rio Grande do Sul, onde, respectivamente, mais de 10 e de 4 milhões de hectares são manejados sob plantio direto. Dada a produção oriunda de áreas sob plantio direto, pode-se dizer que a economia brasileira depende da qualidade do solo das áreas manejadas sob plantio direto.

Nos mais de 10 milhões de hectares manejados sob plantio direto, na Região Subtropical Úmida do Brasil, predominam Latossolos e Nitossolos (IBGE, 2007), os quais são estruturados, bem drenados, profundos, e, portanto, fisicamente favoráveis à prática agrícola. Em condições naturais, entretanto, impõem restrições químicas ao desenvolvimento das plantas. Programas como a operação “tatu” no Rio Grande do Sul, na década de 1960, possibilitaram o uso em larga escala destes solos, com aplicação de elevadas doses de corretivos e fertilizantes aliadas ao revolvimento intenso do solo com o preparo convencional. Isto promoveu a fertilidade química, porém, desencadeou o processo de degradação física do solo. Assim, após 1960, o processo erosivo do solo se intensificou, principalmente, devido à desagregação do solo e à presença de uma camada subsuperficial compactada que diminuía a taxa de infiltração de água no solo (Casão Jr. et al., 2012).

Na região supracitada, no município de Não-Me-Toque, RS, em 1969, e Rolândia, PR, em 1972, foram implementadas as primeiras áreas com plantio direto no Brasil (Cassol et al., 2007). A introdução desta prática de manejo visava diminuir o intenso processo erosivo do solo que ocorria na região. O objetivo foi alcançado, porém, a viabilização do plantio direto, de modo contínuo, requeria, segundo Denardin et al. (2008), um conjunto de preceitos mais amplo do que apenas a mobilização de solo restrita à linha de semeadura e a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo. O plantio direto necessitava ser praticado como um sistema de manejo e não como mera forma alternativa de preparo reduzido de solo.

Em decorrência desta percepção, em meados dos anos 1980, surgiu à expressão sistema plantio direto, que passou a ser conceituado como um complexo de preceitos da

agricultura conservacionista destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos. Este sistema compreende: mobilização de solo exclusivamente na linha ou cova de sementeira ou de plantio; manutenção de resíduos culturais na superfície do solo; diversificação de espécies via rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas; redução ou supressão do intervalo de tempo entre a colheita e a sementeira subsequente; manutenção da cobertura permanente de solo; e aporte de material orgânico ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo (Denardin et al., 2012).

A adoção do plantio direto proporcionou benefícios de ordem econômica e ambiental (Derpsch et al., 2010) e contribuiu para o aumento da produção de grãos no Brasil. Contudo, um sério problema preocupa pesquisadores e profissionais da extensão rural, que atuam na Região Subtropical Úmida Brasileira, a compactação do solo. Em áreas com plantio direto, a compactação tem sido identificada, aproximadamente, entre 0,07-0,20 m de profundidade (De Maria et al., 1999; Denardin et al., 2008). Esta degradação teria várias causas: a) intensa mobilização de solo ainda na época do preparo convencional do solo, formando o pé-de-arado; b) pressão exercida pelo pisoteio animal e tráfego de máquinas e implementos agrícolas em condições de umidade excessiva; c) adoção parcial dos preceitos do sistema plantio direto, principalmente, pela ausência de diversificação de espécies e insuficiente aporte de material orgânico ao solo.

Conforme os autores supracitados, na camada de 0,0-0,07 m, a resistência à penetração das raízes é baixa e a fertilidade química e permeabilidade do solo ao ar e água elevada. A camada 0,07-0,20 m, entretanto, é caracterizada por uma estrutura maciça, onde o solo apresenta baixa permeabilidade ao ar e à água, elevados valores de densidade e resistência à penetração e reduzida fertilidade química. A junção destes fatores pode estar favorecendo a concentração de raízes na camada superficial do solo.

Na camada superficial, por conta da baixa permeabilidade da camada subsuperficial que limita o aprofundamento de raízes e a ascensão de água do subsolo às raízes dispostas superficialmente, o estresse hídrico também se manifesta. Isto tem sido frequente na Região Subtropical do Brasil, levando a frustrações de safras agrícolas em áreas sob plantio direto (Denardin et al., 2008). Ainda, a erosão hídrica do solo voltou a ser identificada nesta região, decorrente da menor permeabilidade do solo à água, que favorece o escoamento superficial. A degradação física e química do solo em plantio direto, portanto, pode resultar em prejuízos econômicos e ambientais para o país.

A prática de semeadura em áreas sob plantio direto, na região, é realizada com semeadoras equipadas com elementos rompedores de solo tipo discos e/ou hastes sulcadoras, que atuam aproximadamente a 0,08 m de profundidade, imprimindo praticidade operacional. Estas semeadoras, ao operar na camada superficial do solo e depositar os fertilizantes superficialmente, acentuam a variação vertical dos atributos químicos do solo, além de não contribuírem para tornar as condições físicas do solo em subsuperfície mais favorável ao aprofundamento das raízes.

Estudos recentes mostram que hastes sulcadoras de semeadoras para plantio direto proporcionam melhores condições físicas ao desenvolvimento radicular, na profundidade em que atuam (Genro Jr. et al., 2004; Drescher et al., 2011). Nestes estudos, porém, a profundidade de ação das hastes sulcadoras foram inferiores a 0,12 m, atuando de forma limitada na camada compactada. Assim, estudos para avaliar o desempenho de semeadoras com elementos rompedores de solo de ação profunda, agindo na camada compactada, são necessários e de importância, visto que em parte, a produtividade das culturas é limitada pela compactação do solo.

A prática mecânica amplamente difundida como alternativa para aliviar a compactação do solo em plantio direto é a escarificação do solo. Esta prática vem sendo recomendada com base em resultados de pesquisa de curta duração, muitas vezes inferiores a um ano e meio. No entanto, resultados obtidos em estudos de média duração indicam que os efeitos positivos desta prática são de curta duração, persistindo por apenas uma ou duas safras agrícola (Prando et al., 2010; Silva et al., 2012). Além disso, a realização da escarificação do solo não se adequa aos preceitos do sistema plantio direto, aumentando o tráfego de máquinas nas lavouras e o gasto de energia não renovável, o que eleva o custo de produção para o agricultor.

Neste contexto foram formuladas as seguintes hipóteses: 1) a escarificação do solo, para remediar restrições físicas impostas pela camada compactada do solo ao desenvolvimento das raízes das plantas sob plantio direto, tem efeito efêmero, inferior a 24 meses; 2) o emprego de elementos rompedores de solo de ação profunda (0,17 m) em semeadora proporciona maior aprofundamento radicular das plantas cultivadas no solo sob plantio direto, em relação aos elementos rompedores de solo tipicamente utilizados na Região Subtropical Úmida do Brasil; 3) o manejo mecânico da compactação do solo, em um curto período, não afeta a agregação da camada compactada do solo em plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil; 4) o plantio direto praticado na Região Subtropical Úmida do Brasil, ao manter a degradação física da camada subsuperficial (0,07-0,20 m) do solo e uma acentuada estratificação química no perfil, concentra o sistema radicular das plantas na camada superficial do solo (0,0-0,07 m).

A dissertação foi elaborada na forma de quatro artigos independentes, sendo que cada artigo está vinculado a uma das hipóteses acima descritas. Estes artigos serão apresentados conforme o esquema abaixo:

ARTIGO I: Escarificação mecânica do solo sob plantio direto: efeitos efêmeros.

ARTIGO II: Semeadora com haste sulcadora de ação profunda: Potencial mitigador da degradação estrutural do solo sob plantio direto.

ARTIGO III: Agregação de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto após o manejo mecânico da compactação do solo.

ARTIGO IV: Atributos físicos e químicos do solo sob plantio direto e o desenvolvimento radicular de milho.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Proporcionar conhecimento que possa contribuir para melhorar as condições físicas do solo em áreas manejadas sob plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil e, assim, possibilitar a diminuição de riscos de frustrações de safras agrícolas em anos de estiagem.

2.2. Objetivos específicos

1. Avaliar o efeito da escarificação do solo, na mitigação da degradação estrutural do solo e no desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.), em um Nitossolo Vermelho, manejado sob plantio direto há mais de dez anos.
2. Avaliar o efeito da utilização de semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m) na mitigação da degradação estrutural do solo sob plantio direto, através da determinação de atributos físicos do solo e parâmetros de planta.
3. Avaliar o efeito do manejo mecânico da compactação do solo, mediante a escarificação e o uso de semeadora com hastes sulcadoras de ação profunda (0,17 m), na agregação e estabilidade de agregados de um Nitossolo Vermelho manejado sob plantio direto há mais de dez anos.
4. Avaliar a influência da degradação física e química do solo em subsuperfície no desenvolvimento radicular das plantas cultivadas em áreas manejadas sob plantio direto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

3.1. Plantio direto e sistema plantio direto: conceitos

O entendimento de sistema plantio direto é variável, porém, segundo Derpsch et al. (2010), é necessário um entendimento comum. Conforme este autor, infelizmente, o sistema plantio direto é adotado como uma simples tecnologia onde as sementes são colocadas no solo sem preparo, sem considerar que este é um sistema complexo e diferente. Ressalta que o sistema plantio direto não é um fator, mas um conjunto de fatores, onde os equipamentos para a semeadura, o manejo de culturas, plantas daninhas e pragas, a fertilização e as variedades devem ser adaptadas para atender os requisitos deste sistema. Dada à importância de entender o que é sistema plantio direto, seguem os conceitos propostos por Denardin et al. (2012):

Plantio direto: ato de depositar no solo sementes, plantas ou partes de plantas na ausência de mobilização de solo por aração ou escarificação e gradagem, e manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo. Esse termo é fiel ao conceito dos termos zero-tillage, no-tillage, ou no-till (sem preparo ou sem amanho do solo) oriundos da Inglaterra e dos EUA. Portanto, plantio direto engloba dois preceitos da agricultura conservacionista: redução da mobilização intensa de solo; e manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo.

Sistema plantio direto: complexo de preceitos da agricultura conservacionista destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos, compreendendo: mobilização de solo apenas na linha ou cova de semeadura ou plantio; manutenção de resíduos culturais na superfície do solo; diversificação de espécies via rotação, sucessão e consorciação de culturas; redução ou supressão do intervalo de tempo entre a colheita e a semeadura subsequente; aporte de material orgânico ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo.

Assim, o sistema plantio direto, aliado a implementação de práticas de controle da erosão hídrica, uso de insumos de forma precisa, controle de tráfego mecânico e animal e adoção do manejo integrado de pragas, torna-se uma estratégia de exploração de sistemas agrícolas que contempla processos tecnológicos preconizados pela agricultura conservacionista.

3.2. Plantio Direto na Região Subtropical Úmida do Brasil

O plantio direto surgiu com a própria agricultura, quando pequenas áreas eram cultivadas sem preparo prévio do solo (Derpsch, 2004). Esta agricultura foi praticada até surgir

o arado, cerca de 4.000 anos A.C. (Cassol et al., 2007). A primeira área comercial com plantio direto foi implementada em 1962, em Herndon, Kentucky, EUA (Derpsch, 2004).

Há divergência quanto à data de introdução do plantio direto no Brasil. Borges (1993) relata que em 1969, os Professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Newton Martins e Luiz Fernando Coelho de Souza semearam, no município de Não-Me-Toque, RS, um hectare de sorgo sem preparo prévio do solo, mantendo os restos culturais remanescentes da cultura de inverno, sendo esta a primeira área manejada sob plantio direto no Brasil. Derpsch (2004), entretanto, afirma que a introdução do plantio direto no Brasil ocorreu em 1971, no Paraná. Pode-se afirmar, portanto, que as primeiras áreas sob plantio direto no Brasil, em nível de pesquisa e de lavoura, foram implementadas na Região Subtropical Úmida do Brasil (Casão Jr. et al., 2012).

Nesta região o solo era cultivado sob preparo convencional do solo via aração seguida de várias gradagens. Dentre as consequências trazidas pela utilização desta prática está à redução da taxa de infiltração de água no solo, devido a sua compactação e a exposição do solo a ação erosiva das chuvas resultando em grandes perdas de solo (Casão Jr. et al., 2012). Mediante este cenário, o plantio direto passou a ser adotado na região como um método de preparo de solo visando o controle da erosão em lavouras cultivadas com a sucessão das culturas trigo-soja. De três a quatro anos após a adoção, entretanto, os agricultores voltavam a preparar o solo na forma convencional (Cassol et al., 2007), pois o plantio direto contínuo era inviável.

Após a percepção de que a viabilização do plantio direto, de modo contínuo, requeria um conjunto de preceitos da agricultura conservacionista mais amplo do que simplesmente a mobilização de solo restrita à linha de semeadura e a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, surgiu, em meados dos anos 1980, o conceito de sistema plantio direto. O sistema plantio direto passou a ser difundido como um conjunto de preceitos capaz de conferir sustentabilidade ao sistema agrícola produtivo (Derpsch et al., 2010; Denardin et al., 2008).

Na maioria das lavouras da Região Subtropical Úmida do Brasil, entretanto, ainda se pratica o plantio direto, em detrimento aos preceitos do sistema plantio direto. Denardin et al. (2012) enfatiza que, para as condições de solo e clima desta região, os preceitos do plantio direto não garantem a conservação do agroecossistema. Falta discernimento para eleger um conjunto de preceitos preconizados pela agricultura conservacionista mais abrangente do que o simples abandono da mobilização de solo e a manutenção de resíduos culturais na superfície do solo.

A área manejada sob plantio direto, no Brasil, ultrapassou 30 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2013). Destes, mais de 10 milhões se distribuem na Região Subtropical Úmida do Brasil e mais de quatro milhões no Rio Grande do Sul. Portanto, considerando que a economia brasileira baseia-se na produção agrícola, sendo creditado ao agronegócio 21,15% do PIB do Brasil, em 2011 (CEPEA-USP/CNA, 2013); e que 38,6% da produção total brasileira de leguminosas, oleaginosas e cereais provem da região Sul e 15,8% do Rio Grande do Sul; pode-se afirmar que a qualidade do sistema plantio direto interfere na econômica brasileira.

Cabe ressaltar que, nos mais de 10 milhões de hectares que são manejados sob plantio direto na Região Subtropical úmida do Brasil, o solo está degradado fisicamente com concentração de nutrientes na camada superficial (Selles et al., 1997; Veiga et al., 2007). A estrutura destes solos foi totalmente alterada com a agricultura, em relação ao solo sob mata nativa, chegando ao ponto de comprometer o aumento da produtividade e a redução efetiva de custos na produção agrícola. É fundamental, portanto, o desenvolvimento de estudos para encontrar alternativas de aliviar a degradação estrutural dos solos sob plantio direto nesta região.

3.3. Importância da estrutura do solo para a atividade agrícola

A planta se desenvolve acumulando matéria seca. Durante a fotossíntese formam-se compostos carbonados que, junto aos nutrientes absorvidos do solo, são ingredientes para a sintetização de carboidratos, proteínas e lipídios (Taiz & Zeiger, 2009).

A água participa da fotossíntese, do transporte e absorção de nutrientes e mantém o turgor celular, responsável pelo crescimento vegetal. A absorção de nutrientes e água depende do desenvolvimento das raízes da planta. Para crescer as raízes abrem caminho na matriz do solo que impede seu avanço, em maior ou menor grau, a depender da resistência do solo a sua penetração (Imhoff et al., 2010; Otto et al., 2011). O oxigênio é essencial para a respiração e liberação de energia (Taiz & Zeiger, 2009). Baixa concentração de oxigênio no solo ocasiona deficiência energética às raízes e, portanto, diminui a absorção ativa e a translocação de nutrientes, afetando o desenvolvimento vegetal (Epstein & Bloom, 2006).

Assim, Letey (1985) definiu que os atributos físicos do solo água, oxigênio, resistência do solo à penetração e temperatura, estão diretamente relacionados com a produtividade das culturas, enquanto os atributos densidade, agregação e porosidade do solo estão indiretamente ligados com a produtividade. A relação dos atributos físicos do solo ligados à disponibilidade de

água, resistência à penetração e porosidade de aeração, portanto, podem indicar a qualidade física do solo (Silva et al., 1994, 2010).

A estrutura do solo resulta do arranjo das partículas do solo e do espaço poroso entre elas, podendo ser descrita pela forma, tamanho e arranjo dos agregados (Marshall, 1962). Ela rege os parâmetros que afetam a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água e calor às plantas, a permeabilidade do solo ao ar, água e raízes e à disponibilidade de nutrientes às plantas. Mudanças na estrutura do solo promovem alterações nos atributos físicos do solo indiretamente e diretamente ligados à produtividade das culturas (Hartge & Stewart, 1995; Tormena et al., 1998). A fertilidade integral do solo, portanto, depende da sua estrutura (Denardin et al., 2012). Logo, no ponto de vista agrícola, a estrutura pode ser considerada a propriedade mais importante do solo (Ferreira et al., 1999).

Solos agrícolas bem estruturados propiciam boas condições para o desenvolvimento das plantas (Ferreira, 2010). Estas condições são alcançadas com a agregação do solo, pois, a formação de micro e macroagregados ocasiona mudança na proporção de volume de vazio e ocupado por partículas sólidas, afetando a quantidade e a distribuição do espaço poroso (Baver et al., 1973; Brady & Weil, 2011). Assim, quanto mais agregado for o solo, maior será a porosidade total e a porosidade de aeração do sistema e menor será a densidade e a resistência do solo à penetração.

3.4. Desenvolvimento da estrutura do solo

3.4.1. Aproximação das partículas e formação dos agregados

Para que os agregados do solo se formem, a primeira condição a ser satisfeita é a aproximação das partículas unitárias do solo (Kiehl, 1979). Esta aproximação pode ocorrer devido ao crescimento de raízes, movimentação de animais de hábito terrestre e o fenômeno de expansão e contração do solo provocado pelos ciclos de molhamento e secagem (Baver et al., 1973; Six et al., 2002; Horn & Peth, 2009). Em adição, atuam forças físico-químicas, resultando na floculação dos colóides do solo, formando agregados microscópicos.

O fenômeno de floculação, por sua vez, depende da quantidade e tipo de cátions presentes no solo, da característica das cargas dos colóides do solo, do ponto de carga zero, do pH (Fontes et al., 2001) e da matéria orgânica do solo (Tisdall & Oades, 1982).

Os minerais de argila podem apresentar cargas permanentes, que surgem na formação dos minerais pela substituição isomórfica, ou variável (Meurer, 2012). As cargas variáveis

originam-se da protonação e desprotonação dos grupos Al-OH ou Si-OH, presentes nas bordas laterais quebradas dos argilominerais e na superfície dos óxidos. Com o aumento do pH ocorre a formação de cargas negativas e com a diminuição do pH do sistema, formam-se cargas positivas. Para os diferentes colóides de carga reversível, existe um valor de pH em que a carga superficial do colóide é zero, sendo este denominado ponto de carga zero (PCZ). Hematita/goethita, gibbsita, caulinita, húmus e esmectita/vermiculita apresentam PCZ igual a 8,5, 7,5, 3,5, menor que 3,0 e nulo, respectivamente (Alleoni et al., 2009a).

O campo elétrico, gerado pelas cargas superficiais, atrai partículas carregadas com carga de natureza contrária. Colóides carregados negativamente atraem cátions, que, ao serem atraídos por duas partículas, servem de ponte entre elas (Brady & Weil, 2011). Ocorre ainda, interação de argilominerais com colóides orgânicos formando pontes unindo as partículas de silte. Quanto mais próximo o pH do solo estiver do PCZ dos colóides, menor será o potencial das cargas, conseqüentemente maior será a floculação das partículas e menor a dispersão, pois as forças elétricas tendem a atrair as partículas uma em direção a outra. Quando o pH e o PCZ se distanciam, ocorre repulsão entre minerais, pois potencial eletro cinético aumenta, predominando cargas de mesma natureza. Estas se repelem afastando as partículas. Porém, devido aos íons adsorvidos, mesmo quando os valores de pH e PZC diferem pode ocorrer floculação. Estes íons modificam o equilíbrio das cargas (Alleoni et al., 2009a).

Quanto menor o raio hidratado e quanto maior a valência dos cátions, menor será a dupla camada difusa, que poderá permanecer dentro da camada de Stern (Stern, 1924, citado por Alleoni et al., 2009a), e o potencial elétrico superficial tenderá a zero, pois além de formar pontes catiônicas entre os argilominerais, os cátions neutralizam as cargas negativas da superfície dos colóides. Quando a dupla camada difusa se encontra delgada, as forças de van der Waals, que atuam a curtas distâncias, passam a atuar com maior intensidade, visto que os argilominerais se aproximam favorecendo a floculação. Portanto íons tri e divalentes são mais floculantes e os monovalentes são os mais dispersantes.

3.4.2. Cimentação e estabilidade estrutural do solo

Após a formação dos complexos floculados, ocorre a cimentação e a estabilização (Kiehl, 1979). O primeiro responsável pela estabilidade é o fenômeno de floculação. Quanto maior a floculação maior será a estabilidade dos agregados e menor será o teor de argila dispersa em água. Portanto, a estabilidade estrutural é altamente depende das condições

químicas do sistema. Mudança na dinâmica das cargas da superfície coloidal poderá provocar a dispersão das partículas de argila (Morelli & Ferreira, 1987), afetando a estabilidade dos agregados e com ela outras propriedades físicas.

A estabilidade dos agregados se correlaciona positivamente com os teores de Al_2O_3 e com os teores de gibbsita, e negativamente com os teores de caulinita (Ferreira et al., 1999). Vitorino et al. (2003) observaram que a mineralogia e a química do solo influenciam na dispersão da argila. Maiores teores de gibbsita refletem em maior estabilidade dos agregados do tamanho de silte e aumento da caulinita proporciona efeito inverso. Azevedo & Bonumá (2004) discutem que a alta estabilidade de agregados em Latossolos é atribuída aos óxidos de Fe e Al.

A matéria orgânica do solo aumenta a estabilidade dos agregados pré-formados (Tisdall & Oades, 1982; Castro Filho et al., 1998; Salton et al., 2008). No solo, a matéria orgânica associa-se com os minerais por diferentes mecanismos: troca de cátions, protonação, troca aniônica, troca de ligantes, pontes de cátions, ligações de hidrogênio, interações devido às forças de van der Waals.

Conforme Tisdall & Oades (1982), os agentes orgânicos envolvidos na estabilização dos agregados do solo podem ser divididos em três grupos, quanto a sua resistência à ação microbiana: os transicionais, responsáveis pela estabilidade dos macroagregados, são rapidamente decompostos; os temporários, associados à estabilidade dos macroagregados, permanecem no solo por semanas, meses ou até anos; e os persistentes.

3.5. Estrutura dos Latossolos e Nitossolos da Região Subtropical Úmida do Brasil

Na Região Subtropical Úmida do Brasil predominam os Latossolos Vermelhos Distroféricos, Distróficos e Aluminoféricos, associados com Nitossolos Vermelhos (IBGE, 2007). Estes solos apresentam elevados teores de óxidos de ferro, baixa saturação por bases, textura argilosa e muito argilosa, fração argila com predomínio de caulinita e hematita, com presença de goethita, maghemita e vermiculita hidroxilada (Ker, 1998).

Em função da mineralogia, o PCZ destes solos encontra-se próximo do pH em água. Este fenômeno é comum em solos altamente intemperizados (Alleoni et al., 2009b). Silva et al. (1996) determinaram o ponto de efeito salino nulo (PESN) (corresponde a uma aproximação do PCZ em Latossolos) e o grau de correlação deste com as características mineralógicas e químicas do solo. Estes autores encontraram, na camada de 0,0-0,20 m em um Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho-Escuro do planalto do Rio Grande do Sul, valores de PESN (3,6

e 3,4) menores que o do pH em água (4,8 e 4,2) e o do pH em KCl (3,8 e 3,8), ou seja, carga líquida negativa na superfície das partículas.

A mineralogia, o elevado teor de alumínio trocável, a baixa saturação por bases e a proximidade entre os valores de pH em água e do PCZ, nestes solos, justificam o seu elevado grau de floculação, os baixos teores de argila dispersa em água e a elevada estabilidade dos agregados, especialmente dos microagregados que são cimentados pela ação dos óxidos de ferro nas argilas silicatadas, que tendem a se aglutinar em uma distribuição bastante específica formando microagregados. Consequentemente, esta estruturação confere ao solo, na condição natural, porosidade total que pode ultrapassar $0,70 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, elevada porosidade de aeração, elevadas taxas de infiltração de água no perfil do solo, elevada permeabilidade ao ar, e um sistema praticamente livre de barreiras físicas naturais impeditivas ao crescimento radicular das plantas, além de apresentar média a baixa suscetibilidade à erosão hídrica.

3.6. Degradação estrutural de Latossolos e Nitossolos da Região Subtropical Úmida do Brasil

3.6.1. Sob preparo convencional do solo

Na sua condição natural, os Latossolos e Nitossolos da Região Subtropical Úmida do Brasil são fisicamente favoráveis à prática agrícola, porém, são ácidos e distróficos. Assim, para elevar a sua fertilidade química, a partir da década de 1960, estes solos receberam elevadas doses de corretivos e fertilizantes e foram intensamente revolvidos (Freire et al., 2006; Casão Jr. et al., 2012). Estas práticas promoveram a fertilidade química do solo, porém, através de ações e reações biológicas, químicas e físicas, degradaram a sua estrutura física. A camada arável destes solos foi transformada em duas fases distintas: uma superficial com estrutura de grãos simples; e outra subsuperficial degradada, com estrutura maciça (Denardin et al., 2005) (Figura 1).

A excessiva pulverização do solo, por arado e grade, promove a diminuição do tamanho dos agregados (Castro Filho et al., 1998; Portella et al., 2012). Conforme Fabrizzi et al. (2009), no preparo convencional do solo, a degradação da sua estrutura deve-se à ação mecânica dos implementos utilizados no preparo, sendo este um efeito direto, e à diminuição do conteúdo de carbono orgânico do solo, sendo este um efeito indireto. A mobilização do solo incorpora corretivos, fertilizantes e resíduos, oxigena o sistema e disponibiliza nutrientes aos microrganismos, acelerando a mineralização do carbono orgânico, que tem estreita relação com a estabilidade estrutural do solo (Castro Filho, et al., 1998; Fabrizzi, et al., 2009). Assim,

os macroagregados são fracionados, culminando com a dispersão do solo em microagregados e partículas unitárias.

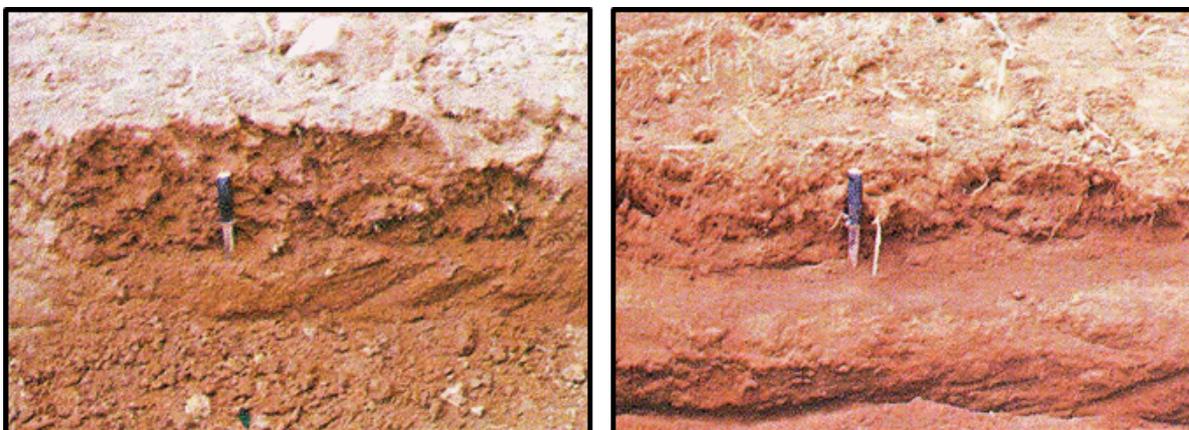


Figura 1. Aspecto da degradação da estrutura da camada subsuperficial de Latossolo, mostrando o chamado “pé-de-arado” e/ou “pé-de-grade” sob preparo convencional do solo.

Parte da degradação pode ser devido ao calcário aplicado ao solo, que reage e libera cátions bivalentes (Ca^{++} e Mg^{++}) e hidroxilas. O Ca^{++} e Mg^{++} são trocados pelo alumínio que até então estava adsorvido na superfície dos colóides, neutralizando três cargas negativas, servindo como contra íon. Como as cargas destes solos são variáveis, além do deslocamento do alumínio, que é precipitado na forma de hidróxido de alumínio, a calagem eleva o potencial eletronegativo da superfície dos colóides e aumenta a espessura da dupla camada difusa. Assim, o potencial eletronegativo propicia a repulsão dos argilominerais e a dispersão do sistema, pois as forças repulsivas passam a serem maiores que as atrativas.

O efeito dispersante do carbonato de cálcio, em Latossolos, foi atribuído por Fontes et al. (1995), à substituição do alumínio pelos cátions Ca^{++} e Mg^{++} e a elevação do pH do meio. Albuquerque et al. (2000) observaram que a aplicação de quantidades crescentes de calcário em um Latossolo ácido aumenta o potencial elétrico negativo superficial e a carga negativa líquida do solo e, conseqüentemente, a dispersão de argila, não afetando, entretanto, o diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis em água. Spera et al. (2008) relatam que a calagem, em Latossolo Vermelho, aumenta a dispersão de microagregados e de argila, e que, corrigindo o pH, o alumínio é precipitado, deixando de atuar como contra íon. A substituição do alumínio trocável pelo Ca^{++} e Mg^{++} atenua o efeito dispersante dos carbonatos.

Durante o preparo convencional do solo, a aração e a gradem do solo são realizadas, ano após ano, na mesma profundidade. Assim, o alívio da compactação do solo ocorre sempre

na mesma camada. A pressão exercida pelo tráfego do trator e pelos discos do arado e/ou grade, no sulco do arado, durante o preparo, promove compactação do solo em subsuperfície. Estes fatores intensificam a estratificação física vertical do solo.

A junção dos fatores químicos, físicos e biológicos, supracitados, com a compactação do solo propriamente ditada, é responsável pela formação da camada subsuperficial de estrutura degradada, durante o preparo convencional do solo. Esta camada é denominada “pé-de-arado” e/ou “pé-de-grade” (Figura 1). Quando o plantio direto é implementado, nestas áreas, a camada subsuperficial degradada pode ser herdada (Tavares Filho et al., 2001). Parte da degradação do solo em subsuperfície, em plantio direto, portanto, ocorreu ainda quando o solo era manejo de forma convencional do solo.

3.6.2. Após a adoção do plantio direto

A pressão exercida pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas (Veiga et al., 2007; Batey, 2009) e pelo pisoteio animal (Lanzanova et al., 2007) sobre o solo, aproxima os microagregados e as partículas diminuindo o volume do solo. Assim, reduz o seu espaço poroso e eleva sua densidade (Rossetti et al., 2012). Isto caracteriza um típico processo de compactação do solo (Dias Jr. & Pierce, 1996).

Na Região Subtropical Úmida do Brasil, as chuvas se distribuem uniformemente durante o ano (Nimer, 1989). Assim, dada à urgência em realizar tratamentos culturais e implantar as culturas, com frequência o solo é trafegado quando se encontra no estado de consistência plástica. Este fato, somado à falta de diversificação de espécies e aporte de material orgânico ao solo em áreas com plantio direto, favorece a degradação pelo processo de compactação do solo (Hamza & Anderson, 2005; Batey, 2009; Brady & Weil, 2011; Rosim et al., 2012).

No modelo de produção adotado na Região Subtropical Úmida do Brasil predomina o cultivo de soja na safra de verão e pousio na safra de inverno - vegetação espontânea de azevém. Este modelo de produção não aporta material orgânico ao solo em quantidade e qualidade suficiente para manter o conteúdo de carbono do solo (Sá, 1995). Dada a importância do carbono na agregação do solo (Castro Filho et al., 1998; Six et al., 2002), este modelo pode levar à degradação da estrutura do solo sob plantio direto (Denardin et al., 2008).

O conteúdo de carbono do solo está diretamente relacionado à quantidade e qualidade de resíduos culturais que entram no sistema (Amado et al., 2001; Sá et al., 2001). O cultivo de soja gera resíduos de baixa relação C:N, os quais são rapidamente decompostos (Sá, 1995) e

estimula a degradação do carbono oriundo dos cultivos anteriores por fornecer nitrogênio para a microbiota do solo (Sá et al., 2001). Sá et al. (2001) observaram, 10 anos após a conversão de um campo nativo em lavoura sob plantio direto, decréscimo no conteúdo de carbono orgânico do solo devido à mineralização da matéria orgânica ser maior que a deposição de material orgânico ao solo pelos cultivos realizados na área, sendo, na safra de verão sete de soja e três de milho e na safra de inverno quatro de trigo e seis de feijão preto.

Em áreas sob plantio direto, a adição de calcário e de fertilizantes é realizada na superfície do solo. Isto, indiretamente, contribui para a degradação do solo em subsuperfície, pois, favorece o desenvolvimento das raízes das culturas somente na camada superficial do solo, onde a fertilidade química é elevada (Selles et al., 1997; Nunes et al., 2011). Assim, ao longo do tempo, pode ocorrer a degradação do carbono orgânico (Sá et al., 2001) e, por consequência, da estrutura do solo em subsuperfície, dada a importância do carbono e do desenvolvimento radicular para a agregação do solo (Castro Filho et al., 1998; Garcia & Rosolem, 2010; Brandão & Silva, 2012).

Segundo Spera et al. (2008) a aplicação em excesso de calcário no solo sob plantio direto pode dispersar argilominerais, contribuindo com a degradação estrutural do solo nestas áreas. Carvalho Jr. et al. (1998) afirma que a calagem e a adubação salina influenciam, de maneira consistente, a formação de camadas subsuperficiais adensadas e/ou compactadas, principalmente por aumentarem a dispersão de argila.

3.7. Algumas consequências da degradação estrutural do solo sob plantio direto

A estrutura do solo rege os parâmetros que determinam a capacidade de armazenamento e disponibilidade de água, capacidade de armazenamento e difusão de calor, a permeabilidade ao ar, água e raízes, o nível de acidez e a disponibilidade de nutrientes às plantas (Silva et al., 2010; Denardin et al., 2012). Portanto, à estrutura estão associadas propriedades fundamentais na relação solo-água-planta (Ferreira et al., 1999).

A compactação altera o arranjo das partículas e dos agregados do solo influenciando na relação massa/volume. Assim, afeta a quantidade e a distribuição dos poros do solo (Brady & Weil, 2011), e conseqüentemente, a densidade do solo e resistência à penetração (Dias Jr. & Pierce, 1996; Ferreira, 2010), a difusão dos gases, a disponibilidade de água e nutrientes às plantas (Camargo & Alleoni, 2006) e o crescimento radicular (Reichert et al., 2009). A compactação do solo, portanto, pode reduzir a produtividade das culturas.

Quanto maior o grau de compactação do solo, maior será a sua densidade e resistência à penetração, e menor deverá ser a sua porosidade (Reichert et al., 2009). A redução da porosidade ocorre em detrimento dos poros maiores, responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo, sendo estes os primeiros a serem destruídos (Reichert et al., 2007). A compactação, portanto, diminui a macroporosidade e aumenta a microporosidade do solo.

A compactação, desta forma, modifica também as propriedades hídricas do solo (Klein & Libardi, 2002; Castro et al., 2010). O tamanho dos poros determina o potencial da água retida no solo (Libardi, 2005). Quanto maior o diâmetro do poro, menor será a sucção aplicada para retirar a água. Em contrapartida, quanto menor o diâmetro do poro maior será a sucção necessária para retirar a água. Então, a baixas tensões, um solo compactado retém menos água do que um solo pouco compactado, e, a altas tensões, um solo compactado retém mais água em comparação a um solo pouco compactado, porém, com mais energia. Este fenômeno deve-se ao aumento da microporosidade do solo com a compactação.

A diferença entre a umidade volumétrica do solo na capacidade de campo e a umidade no ponto de murcha permanente remete para o volume de água disponível para as plantas (van Lier, 2010). Multiplicando este valor pela espessura da camada de solo explorada pelas raízes, obtém-se a capacidade de água disponível armazenada. A verdadeira capacidade de campo é de difícil determinação (van Lier 2010), sendo tida como a água retida no solo depois que todo o excesso tenha sido drenado (Reichardt & Timm, 2004; Libardi, 2005). Os valores de 33, 10 e 6 kPa de sucção são normalmente aceitos como equivalentes à capacidade de campo. O ponto de murcha permanente é tido como o conteúdo de água do solo, em que as folhas de uma planta que nele cresce, atinge o estado de murchamento irreversível. O valor de 1.500 kPa de sucção é adotado como o ponto de murcha permanente.

A compactação, assim, reduz a quantidade de água disponível para as plantas, devido à redução do tamanho dos poros e da porosidade total e aumento da microporosidade. Isto resulta na diminuição do volume de água retida próximo à capacidade de campo e aumento da quantidade de água retida em maiores tensões, dificultando o aproveitamento pelas plantas (Brady & Weil, 2011), além de diminuir o volume de solo explorado pelas raízes.

Embora a definição de valores críticos desafie os cientistas do solo, não há dúvidas de que as propriedades físicas do solo influenciam no desenvolvimento e crescimento das raízes (Silva et al., 1994, 2010; Tormena et al., 1998; Imhoff et al., 2010; Bergamin et al., 2010), o que pode resultar em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e menor produtividade das plantas (Secco et al., 2009; Chen & Weil, 2011).

Em um Latossolo Vermelho, Beutler & Centurion (2004) observaram que a elevação da resistência do solo à penetração promove mudanças na distribuição do sistema radicular de soja e aumento na espessura das raízes na camada compactada. Já Tavares Filho et al. (2001) observaram, em um Latossolo Roxo, que a resistência à penetração superior a 3,5 MPa, não restringe o desenvolvimento radicular de milho, porém influencia a morfologia das raízes. Segundo estes autores, se a estrutura do solo permitir a difusão de oxigênio e as condições químicas e de umidade do solo forem ideais para o desenvolvimento radicular, mesmo com valores de resistência à penetração acima daquelas relatados como restritivos, as raízes irão se desenvolver em pontos de menor resistência.

Otto et al. (2011) verificaram, em um Latossolo Vermelho, que o desenvolvimento das raízes de cana-de-açúcar foi severamente afetado com valores de resistência à penetração de 2,0 MPa. Imhoff et al. (2010) detectaram restrições ao desenvolvimento radicular de milho, com resistência à penetração de 0,9 MPa. Para De Maria et al. (1999), porém, a resistência à penetração e densidade do solo não determinam, necessariamente, redução da densidade de raízes em plantio direto. Isto pode decorrer da continuidade estrutural para o desenvolvimento radicular observadas em solos em plantio direto (Tavares Filho et al., 2001). Devido ao sistema de poros mais estável nestes solos, os valores críticos de resistência à penetração podem ser superiores em comparação ao solo manejado de forma convencional (Stone et al., 2006).

Contudo, a compactação do solo sob plantio direto, na Região Subtropical Úmida do Brasil, tem concentrado as raízes das culturas na camada entre 0-0,05 m (De Maria et al. 1999), levando a frustrações de safra. Conforme levantamento da CONAB, na safra 2011/2012, a quebra na produção de milho no Rio Grande do Sul superou 44% e, em Santa Catarina, 35%, reduzindo a produção nacional de grãos. Nas lavouras de soja e de feijão a produção também foi severamente afetada, nestes dois estados brasileiros. Para Denardin et al. (2008) isto decorre da degradação estrutural do solo em plantio direto, uma vez que, a camada 0,07-0,2 m destes solos, compactada, limita o aprofundamento das raízes e a ascensão capilar de água (Silva et al., 2009) para a camada superficial, onde o sistema radicular se distribui e o estresse hídrico se manifesta, mesmo em pequenos períodos sem chuva.

A erosão hídrica do solo também configura entre as consequências da degradação da estrutura do solo em plantio direto. A erosão é potencializada pela menor taxa de infiltração de água em solo compactado (Barcelos et al., 2003; Lanzasova et al., 2007; Silva et al., 2009; Prando et al., 2010). Com a diminuição da infiltração, a água passa a escoar na superfície do solo, formando enxurradas, arrastando as partículas do solo.

Nos últimos anos, com frequência, a erosão hídrica do solo tem sido identificada em áreas manejadas sob plantio direto na Região Subtropical Brasileira (Figura 2a, 2b e 2c) (Denardin et al., 2011; Mell, 2012; Streck, 2012). Este problema foi destaque na XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, ocorrida em 2012.

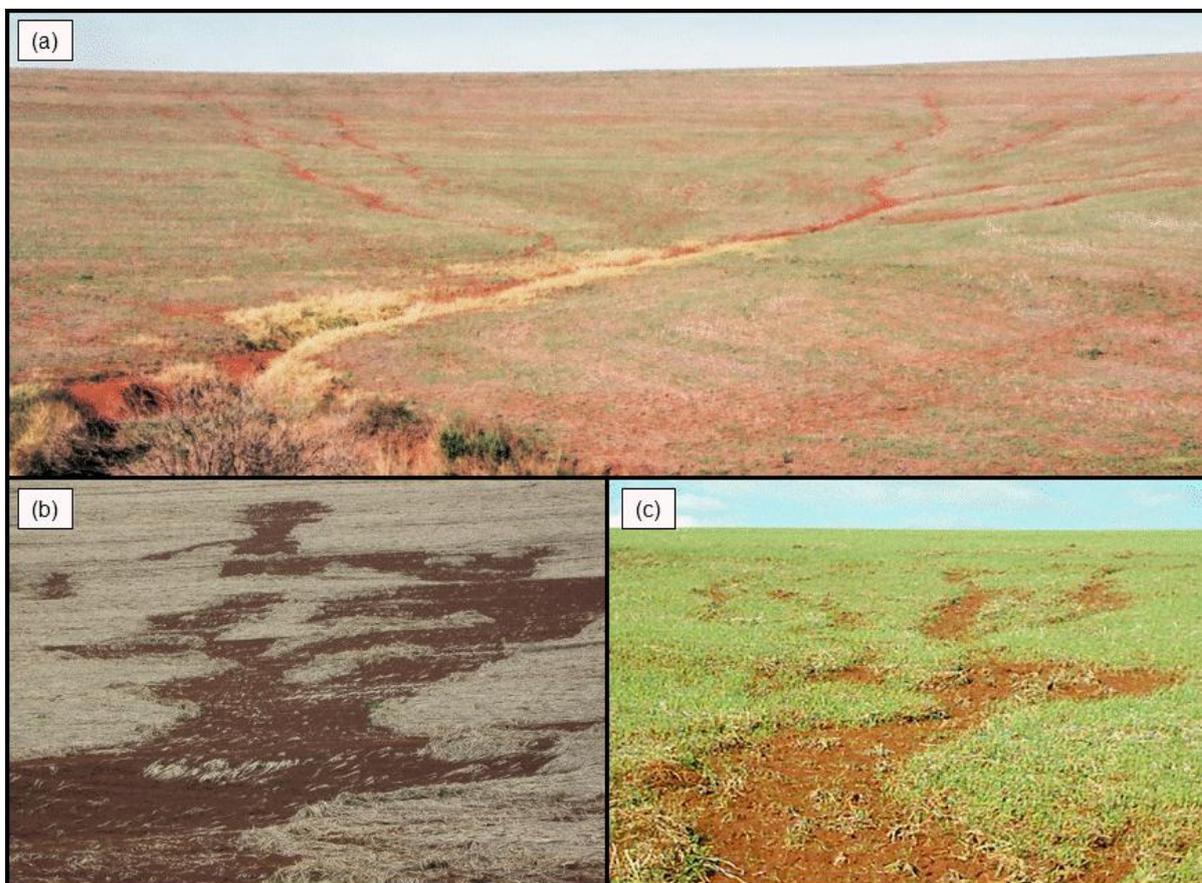


Figura 2. Erosão hídrica em áreas conduzidas sob plantio direto, na Região Subtropical do Brasil. Fotos: (a) Paulo Kurtz, Embrapa Trigo; (b) Nilvania Aparecida de Mell, Núcleo paranaense de ciência do solo; (c) Edegar Valdir Streck, Emater-Ascar.

Segundo Denardin et al. (2008) e Streck et al. (2012), no Rio Grande do Sul, a erosão do solo sob plantio direto é frequente e pode comprometer a estabilidade da produção agrícola. Para estes autores, este problema decorre, além do abandono das técnicas de conservação do solo (plantio em contorno, construção e manutenção de terraços, rotação de culturas, manutenção permanente da cobertura do solo), da degradação física do solo nestas áreas.

A erosão hídrica em áreas agrícolas promove: transporte de agroquímicos presentes na superfície do solo, promovendo prejuízos econômicos e ambientais, transporte de corretivos e fertilizantes, partículas de solo, material orgânico e água para fora da lavoura ocasionando

poluição de mananciais de superfície, redução do volume de água armazenado no solo e redução da recarga de aquíferos subterrâneos.

3.8. Manejo mecânico da compactação do solo sob plantio direto

3.8.1. Escarificação mecânica do solo

A escarificação do solo, corriqueiramente, é adotada na tentativa de descompactar o solo em áreas manejadas sob plantio direto. Conforme Klein & Klein (2012), a ação mecânica das hastas escarificadoras rompe o solo nas zonas de maior friabilidade, sem causar grandes danos à estrutura do solo, promovendo melhor distribuição do diâmetro dos poros, aumento da porosidade total, aumento da rugosidade superficial, aumento da capacidade de infiltração de água, diminuição da densidade relativa e diminuição da resistência do solo à penetração.

Estudos mostram efeitos positivos da escarificação sobre atributos físicos do solo sob plantio direto: Collares et al. (2008) observaram, dois meses após a escarificação de um Latossolo Vermelho, que esta prática mecânica é eficaz na diminuição da compactação do solo sob plantio direto, principalmente em reduzir a resistência à penetração; Câmara & Klein (2005) observaram, seis meses após o manejo mecânico, que a escarificação do solo sob plantio direto, reduziu a densidade do solo e aumentou a rugosidade superficial, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo. Estes autores concluíram que a escarificação é uma técnica eficaz em melhorar a conservação do solo e da água. Klein (2011) avaliou o efeito da escarificação de um Latossolo Vermelho, um ano após a escarificação, e concluiu que a prática aliviou a compactação do solo e proporcionou maiores rendimentos de massa seca de aveia e maior rendimento de grãos de milho.

Nos estudos supracitados, o período decorrido entre a realização da escarificação do solo e a avaliação dos seus efeitos foi curto, igual ou inferior a um ano. Este intervalo de tempo pode ser insuficiente para afirmar que a escarificação mecânica do solo é eficiente em mitigar a compactação e promover melhorias efetivas no solo sob plantio direto.

Segundo Corsini & Ferraudo (1999) a escarificação do solo tem efeito imediato sobre a densidade e porosidade do solo. Para estes autores, a depender da cultura estabelecida e do regime de chuvas após a escarificação, o efeito da mobilização, na estrutura do solo, é inferior a três meses. A persistência dos efeitos sobre prática sobre propriedades físicas do solo depende do manejo realizado após a prática mecânica. Secco & Reinert (1997) relatam que o efeito da escarificação persiste por 10 meses em solo de textura muito argilosa. Vieira & Klein

(2007), após decorrer dois anos da escarificação do solo sob plantio direto, não observaram diferença na densidade do solo.

Há controvérsias em relação aos efeitos da escarificação do solo ao longo do tempo. É provável que os efeitos da intervenção mecânica, sobre atributos físicos do solo, em Latossolos e Nitossolos sob plantio direto, sejam efêmeros (Da Rosa et al., 2008; Drescher et al., 2011; Silva et al., 2012). Esta prática, portanto, pode ser ineficaz na melhoria efetiva da estrutura destes solos, especialmente na Região Subtropical Úmida do Brasil, onde o regime pluviométrico é bem distribuído durante o ano e a precipitação pluvial normal pode chegar a $1.800 \text{ mm ano}^{-1}$ (Nimer, 1989).

Destaca-se ainda, que a prática da escarificação do solo fere os preceitos preconizados pela agricultura conservacionista, pois aumenta o tráfego de máquinas nas lavouras, aumenta o gasto de energia não renovável e aumenta o custo de produção das culturas, para o agricultor.

A efemeridade dos efeitos proporcionados pela escarificação do solo pode estar ligada à tentativa de mitigar a compactação do solo apenas com a prática mecânica. Segundo Nicoloso et al. (2008) o efeito da escarificação em Latossolo de textura muito argilosa, em época de elevada precipitação, não perdurou por mais de nove meses. Porém, quando após a escarificação introduziram plantas de cobertura, o efeito foi prolongado e atribuído a presença de raízes no solo escarificado.

3.8.2. Semeadoras com hastes sulcadoras para ação profunda

O emprego de semeadoras equipadas com hastes sulcadoras de ação profunda, pode ser uma alternativa para mitigar a compactação do solo sob plantio direto. Porém os estudos para avaliar os efeitos desta técnica ainda são ínfimos e, portanto, não permitem uma conclusão definitiva a respeito dos seus benefícios.

Koakoski et al. (2007) observaram que o mecanismo rompedor de solo tipo “facão”, gera em média, porosidade total do solo 24,3% superior à alcançada pelo mecanismo rompedor de solo tipo disco. Segundo Faganello et al. (2009) a utilização de uma semeadora equipada com elementos rompedores de solo tipo “facão” de ação profunda mitiga a compactação do solo. Cepik et al. (2010) estudaram o efeito da profundidade de ação da haste sulcadora de uma semeadora sobre a mobilização de solo no sulco de semeadura em solo sob plantio direto. Relataram que, na semeadura de milho, o aumento de 0,05 m na profundidade de ação da haste sulcadora (0,065 para 0,115 m) implicou em 20,6% de aumento na área de solo

mobilizada, sendo clara a diferença entre as profundidades de ação do sulcador quanto ao volume de solo mobilizado. Utilizando espaçamento entre linhas de 0,80 m, e três linhas, quando a profundidade passou de 0,065 para 0,115 m, houve aumento de mobilização de solo, da ordem de $13,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, e utilizando cinco linhas, o incremento de solo mobilizado, com aumento da profundidade de ação de 0,071 para 0,113 m, foi de $36,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Conforme Drescher et al. (2011) a utilização de uma semeadora com elemento rompedor de solo tipo disco de corte mais haste sulcadora, em comparação à semeadora apenas com discos duplos, proporcionou maior macroporosidade e menor densidade, na camada 0,07-0,15 m de um Latossolo Vermelho sob plantio direto.

Assim, hastes sulcadoras de ação profunda, acopladas às semeadoras para plantio direto, podem ser eficientes em aliviar a compactação do solo sob plantio direto, desde que, operem na profundidade da camada compactada. As hastes podem formar um sulco para a deposição das sementes, além de favorecer a movimentação, no perfil do solo, de fertilizantes e corretivos, concentrados na superficial do solo sob plantio direto, aumentando a fertilidade química do solo na camada subsuperficial. Melhores condições físicas e químicas do solo, proporcionadas pela ação das hastes sulcadoras, possibilitariam o aprofundamento de raiz na camada subsuperficial. Isto diminuiria os riscos de frustrações de safra provocadas pelas estiagens.

Dada à importância do sistema radicular no processo de agregação do solo, já bem elucidada (Garcia & Rosolem, 2010; Brandão & Silva, 2012), o aprofundamento radicular possibilitaria maior duração do efeito físico proporcionado pelas hastes sulcadoras de ação profunda. Além do que, se aliado à utilização da semeadora com hastes sulcadora de ação profunda, for adotado um modelo de produção que utilize plantas com sistema radicular agressivo, ao longo do tempo, a concentração de carbono orgânico no solo poderá aumentar, contribuindo para a reestruturação do solo da camada estruturalmente degradada.

3.9. Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTANA, E.C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 295-300, 2000.

ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A.; CASAGRANDE, J.C.; SOARES, M.R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p. 381-447, 2009b.

ALLEONI, L.R.F.; MELLO, J.W.V.; ROCHA, W.S.D. Eletroquímica, adsorção e troca iônica no solo. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. **Química e mineralogia do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, p. 69-129, 2009a.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 189-197, 2001.

AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 609-617, 2004.

BARCELOS, A.A.; CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E. Infiltração de água em um Latossolo Vermelho-Escuro sob condições de chuva intensa em diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 35-53, 2003.

BATEY, T. Soil compaction and soil management – a review. **Soil Use and Management**, v. 25, p. 335-345, 2009.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Física de Suelos**. Barcelona, Union Tipográfica Editorial Hispano Americana, 1973. 529p.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681-691, 2010.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 581-8, 2004.

BORGES, G.O. Resumo histórico do plantio direto no Brasil. In: **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo, Aldeia Norte, Embrapa-CNPT/Fundacep Fecotrigo/Fundação ABC-1993. p.13-18.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**, 14 th ed. New Jersey: Pearson Education International. 2011.

BRANDÃO, E.D.; SILVA, I.F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1193-1199, 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, p. 789-796, 2005.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Efeitos da compactação em atributos do solo**. 2006. Disponível em: <<http://www.infobibos.com/Artigos/CompSolo/C4/Comp4.htm>>. Acesso em: 12 de junho de 2012.

CARVALHO Jr., I.A.; FONTES, L.E.F.; COSTA, L.F. Modificações causadas pelo uso e a formação de camadas compactadas e, ou, adensadas em um Latossolo Vermelho-Escuro textura média, na região do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 505-514, 1998.

CASÃO Jr., R.; ARAÚJO, A.G.; LLANILLO, R.F. **Plantio Direto no Sul do Brasil: Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista** – Londrina: IAPAR, 2012. 77 p.: il. ISBN: 978-85-88184-40-4.

CASSOL, E.A.; DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A. Sistema plantio direto: Evolução e implicações sobre a conservação do solo e da água. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, v.5, p.333-370.

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

CASTRO, O.M.; VIEIRA, S.R.; SIQUEIRA, G.M. Atributos físico-hídricos de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob diferentes sistemas de manejo. **Bragantia**, v. 69, p. 433-443, 2010.

CEPEA-USP/CNA. **PIB do Agronegócio**. 2013. Disponível em: <http://cepea.esalq.usp.br/pib/>

CEPIK, C.T.C.; TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; CONTE, O. Força de tração e mobilização do solo por hastes sulcadoras de semadoras-adubadoras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, 561–566, 2010.

CHEN, G.; WEIL, R.R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil & Tillage Research**, v. 117, p. 17–27, 2011.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 933-942, 2008.

CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 289-298, 1999.

Da ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 395-400, 2008.

De MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 703-709, 1999.

DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; SANTI, A. Falhas na implementação do sistema plantio direto levam a degradação do solo. **Revista Plantio Direto**, v. 18, p. 33-34, 2008.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, N.D. Sistema agrícola produtivo: fator de promoção da fertilidade integral do solo. In: **Workshop Sobre Plantio Direto no Estado de São Paulo**. Campinas, 2005. (Org) Sonia Carmela Falci Dechen. Piracicaba: Fundação Agrisus; FEALQ; Campinas: Instituto Agrônomo, 2005. p.156-167.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A. 15 de abril dia nacional da conservação do solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não? **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p.10-15, 2011.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N.D.; WIETHÖLTER, S. Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista. ISSN 1518-6512 Dezembro, 2012. (**Documento online número 141**).

DERPSCH, R. History of Crop Production With & Without Tillage. **Leading Edge, The Journal of No-Till Agriculture**, v. 3, n. 1, p. 150-154, 2004.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, 2010. Disponível em: <http://www.ijabe.org>.

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

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1713-1722, 2011.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Emanuel Epstein e Arnold J. Bloom. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina, 2006. 403p.

FABRIZZI, K.P.; RICE, C.W.; AMADO, T.J.C.; FIORIN, J.; BARBAGELATA, P.; MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: Effect of native and agroecosystems. **Biogeochemistry**, v. 92, p. 129–143, 2009.

FAGANELLO, A.; DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; SATTTLER, A. Efeito de elementos rompedores de solo em semeadoras para plantio direto na resistência do solo à tração mecânica. 2009. 21 p. (Embrapa Trigo. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, 69).

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Disponível em: http://www.febrapdp.org.br/download/PD_Brasil_2013.I.pdf. Acesso: 15 de junho de 2013.

FERREIRA, M.M. Caracterização física do solo. In: JONG van LIER, Q. de. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.1-27.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 515-524, 1999.

FONTES, M.P.F.; CAMARGO, O.A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agrícola**, v. 58, p. 627-646, 2001.

FONTES, M.P.F.; GJORUP, G.B.; ALVARENGA, R.C.; NASCIF, P.G.S. Calcium salts and mechanical stress effects on waterdispersible clay of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, p. 224-227, 1995.

FREIRE, J.R.; COSTA, J.A.; STAMMEL, J.G. Principais fatores que proporcionaram a expansão da soja no Brasil. **Revista Plantio Direto**, 2006.

GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1489-1498, 2010.

GENRO Jr., S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 477-484, 2004.

HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, p. 121-145., 2005.

HARTGE, K.H.; STEWART, B.A. **Soil Structure: Its Development and Function**. CRC, Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1995.

HORN, R.; PETH, S. Soil structure formation and management effects on gas emission. **Biologia**, v. 64, p. 449-453, 2009.

IBGE. **Indicadores IBGE - Estatística da Produção Agrícola**, 2013.

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**. 2ª edição, Rio de Janeiro, 2007.

IMHOFF, S.; KAY, B.D.; SILVA, A.P.; HAJABBASI, M.A. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 303-310, 2010.

KER, J.C. Latossolos do Brasil: Uma revisão. **Geonomos**, v. 5, p. 17-40, 1998.

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

KLEIN, C. Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Vermelho em plantio direto escarificado sobre o rendimento de grãos de milho. Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo, 2011, 119p. (Dissertação de Mestrado)

KLEIN, V.A.; KLEIN, C. As relações dos atributos físicos com o manejo do solo: estratégias e aplicações. In: **XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Conservação do Solo e da Água no Brasil: Preceitos e Ações no Ensino, na Pesquisa e na Extensão**. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2012. 05p. CD ROM.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 857-867, 2002.

KOAKOSKI, A.; SOUZA, C.M.A.; RAFULL, L.Z.L.; SOUZA, L.C.F.; REIS, E.F. Desempenho de semeadora-adubadora utilizando-se dois mecanismos rompedores e três pressões da roda compactadora. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 725-731, 2007.

LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1131-1140, 2007.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

MARSHALL, T.L. The nature, development and significance of structure. In: NEALE, G.J., ed. **Transactions of joint meeting of commissions**, 4 & 5. Palmerston North, 1962. p.243-257.

MELL, N.A. Conservação do solo: um antigo problema atual. **Portal Oeste PR**, 2012. Disponível em: <http://www.portaloestepr.com.br/conservacao-do-solo-um-antigo-problema-atual/> Acesso em 15 de novembro de 2013.

MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 5ª edição. 2012.

MORELLI, M.; FERREIRA, F.B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas de um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 1-6, 1987.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1723-1734, 2008.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 1989. 442p.

NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; VIVALDI, L.J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 877-888, 2011.

OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil & Tillage Research**, v. 117, p. 201-210, 2011.

PORTELLA, C.M.R.; GUIMARÃES, M.F.; FELLER, C.; FONSECA, I.C.B.; TAVARES FILHO, J. Soil aggregation under different management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1868-1877, 2012.

PRANDO, M.B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A.P.E.; ROSOLEM, C.A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 693-700, 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações**. Barueri: Manole, 2004, 478p.

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

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

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

ROSSETTI, K.V.; CENTURION, J.F.; OLIVEIRA, P.R.; ANDRIOLI, I. Atributos físicos nos tempos de adoção de manejos em Latossolo cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 367-376, 2012.

SÁ, J.C.M. Rotação de culturas: Produção de biomassa e benefícios à fertilidade do solo; pg. 5 - 13. In: **Curso sobre manejo do solo em sistema de semeadura direta**. 1995. Castro/PR, 344 p.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.J. Organic mater dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1486-1499, 2001.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 11-21, 2008.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-escuro sob PD. **Engenharia Agrícola**, v. 16, p. 52-61, 1997.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. 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.

SELLES, F; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A.; Distribution of phosphorus fractions in a brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 44, p. 23-34, 1997.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In: van LIER, Q., ed. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p.541-281.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MELO, J.J.G.S.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M. Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de Latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, p. 663-671, 1996.

SILVA, S.G.C.; SILVA, A.P; GIAROLA, N.F.B; TORMENA, C.A.; SÁ, J.C.M. Temporary Effect of Chiseling on the Compaction of a Rhodic Hapludox under No-Tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 547-555, 2012.

SILVA, V.L.; DIECKOW, J.; MELLEK, J.E.; MOLIN, R.; FAVARETTO, N.; PAULETTI, V.; VEZZANI, F.M. Melhoria da Estrutura de um Latossolo por Sistemas de Culturas em

Plantio Direto nos Campos Gerais do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 983-992, 2012.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 35-43, 2009.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M.; ALBRECHI, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. **Agronomie**, v. 22, p. 755-775, 2002.

SPERA, S.T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SANTOS, H.P.; FIGUEROA, E.A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2613-2620, 2008.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; MOREIRA, J.A.A. Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 39p. (Documentos, 191).

STRECK, E.V. Mitos e verdades sobre a conservação do solo no Rio Grande do Sul. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 5, p. 31-38, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4^a ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 725-730, 2001.

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

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

van LIER, Q. de J. Disponibilidade de água às plantas. In: van LIER, Q. de. **Física do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 283-298.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 92, p. 104-113, 2007.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A., Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

VITORINO, A.C.T.; FERREIRA, M.M.; CURI, N.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; MOTTA, P.E.F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 133-141, 2003.

4. ARTIGO I: Escarificação mecânica do solo sob plantio direto: efeitos efêmeros

4.1. Resumo

A degradação estrutural do solo manejado sob plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil é um problema generalizado. A escarificação do solo é corriqueiramente praticada na tentativa de mitigar este problema, porém, além desta prática não seguir os preceitos do sistema plantio direto, a persistência dos seus efeitos é questionada. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da escarificação mecânica do solo na mitigação da degradação estrutural e no desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) em um Nitossolo Vermelho sob plantio direto, na Região Subtropical Úmida do Brasil. Em uma área manejada há mais de 10 anos sob plantio direto, a cada seis meses uma parcela, por bloco, foi escarificada e após a escarificação foram introduzidas as seguintes culturas: 09/2009 - milho, 03/2010 - trigo (*Triticum aestivum* L.), 09/2010 - soja (*Glycine max* (L.) Merr.), 03/2011 - centeio (*Secale cereale* L.) e 09/2011 - milho. Os tratamentos constituíram-se no tempo decorrido entre a escarificação e a semeadura do milho em 09/2011 (última safra antes da avaliação), correspondendo a: 0, 6, 12, 18 e 24 meses. Uma parcela por bloco não foi escarificada, sendo esta considerada a testemunha. Os efeitos dos tratamentos foram avaliados através da determinação de atributos físicos do solo (densidade, porosidade total, macroporosidade, resistência do solo à penetração, grau de compactação e água disponível), do desenvolvimento de plantas (densidade radicular e diâmetro de colmo) e da produtividade do milho cultivado na última safra antes da avaliação. Os resultados apontaram a efemeridade dos efeitos provenientes da escarificação mecânica nos atributos físicos do solo e no desenvolvimento das plantas de milho. A técnica, portanto, não proporciona melhorias efetivas na estrutura de solo em plantio direto, na Região Subtropical Úmida do Brasil.

4.2. Introdução

O sistema plantio direto é conceituado como um complexo de preceitos da agricultura conservacionista destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos. Este compreende: mobilização de solo apenas na linha ou cova de semeadura; manutenção de resíduos culturais na superfície do solo; diversificação de espécies via rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas; redução ou supressão do intervalo de tempo entre a colheita e a semeadura posterior; cobertura permanente do solo; aporte ao solo de material orgânico em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo (Denardin et al. 2011).

Na Região Subtropical Úmida do Brasil, entretanto, são adotados apenas dois dos preceitos da agricultura conservacionista: mobilização de solo restrita à linha de semeadura e manutenção dos restos culturais na superfície do solo. Assim, nesta região, se pratica o plantio direto em detrimento aos preceitos do sistema plantio direto. O plantio direto, adotado como uma prática, sem ser compreendido como um sistema de manejo, não confere sustentabilidade ao sistema agrícola produtivo (Derpsch et al., 2010), tanto que, nas áreas sob plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil, a compactação do solo vem tornando-se um problema generalizado (De Maria et al., 1999; Veiga et al., 2008; Secco et al., 2009; Reichert et al., 2009).

A compactação do solo sob plantio direto confere à camada subsuperficial (0,07-0,20 m), elevada resistência à penetração e baixa permeabilidade ao ar e à água (Tormena et al., 1998; Silva et al., 2009), induzindo a concentração das raízes das plantas na camada superficial do solo (De Maria et al., 1999; Secco et al., 2009). Isto diminui o volume de solo explorado e a absorção de água e nutrientes pelas plantas, levando à queda de produtividade (Secco et al., 2009; Chen & Weil, 2011). Na Região Subtropical Úmida do Brasil, frustrações de safras agrícolas são frequentes, o que para Denardin et al. (2008) está associado a degradação do solo sob plantio direto, uma vez que a camada subsuperficial degradada limita a ascensão de água do subsolo para a camada superficial (Silva et al., 2009), onde o sistema radicular se distribui, levando a manifestação do estresse hídrico mesmo em curtos períodos de estiagens.

A escarificação mecânica do solo tem sido adotada para aliviar a degradação física do solo sob plantio direto. Collares et al. (2008), dois meses após à escarificação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto, verificaram que a técnica diminui a resistência do solo à penetração. Câmara & Klein (2005) concluíram, um ano após a escarificação de solo em plantio direto, que a técnica melhorou a conservação do solo e da água por reduzir a densidade e aumentar a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo. A escarificação mecânica do solo, portanto, proporciona efeitos positivos nos atributos físicos do solo, porém, a persistência destes efeitos tem sido questionada (Prando et al., 2010; Silva et al., 2012)

Estudos com duração de um ano ou mais, para avaliar o efeito da escarificação nos atributos físicos do solo e no desenvolvimento de plantas, ainda são escassos. A maioria dos trabalhos encontrados aponta efemeridade dos efeitos proporcionados pela técnica mecânica (Da Rosa et al., 2008; Drescher et al., 2012). Após decorrer 12 meses da escarificação, Prando et al. (2010) constataram não haver mais efeito sobre a infiltração de água em um Nitossolo Vermelho. Através do grau de compactação e da densidade do solo, Silva et al. (2012)

constatarem que o efeito da escarificação em um Latossolo Vermelho tem duração inferior a um ano e que a prática aumenta os riscos de compactação do solo em profundidade.

Ressalta-se ainda, que a escarificação do solo contrapõem-se aos preceitos do sistema plantio direto, incluindo maior tráfego de máquinas nas lavouras e maior custo de produção para os agricultores (Bertoline & Gamero 2010). Desta forma, segundo Denardin et al. (2011), a carência de discernimento para eleger um conjunto mínimo de práticas exigidas e essenciais para induzir conservacionismo a distintos sistemas produtivos, está restringindo a implementação plena da agricultura conservacionista na Região Subtropical Úmida do Brasil.

Neste contexto formulou-se a hipótese de que a escarificação mecânica do solo, para remediar restrições físicas impostas pela camada subsuperficial do solo ao desenvolvimento radicular das plantas, em áreas sob plantio direto, têm efeito efêmero, inferior a 24 meses. A técnica, portanto, não deve proporcionar a melhoria efetiva da estrutura do solo nestas áreas.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da escarificação mecânica do solo, na mitigação da degradação estrutural do solo e no desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, manejado em plantio direto há mais de 10 anos, na Região Subtropical Úmida do Brasil.

4.3. Material e métodos

Área e delineamento experimental

O estudo foi conduzido no campo experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, unidade descentralizada Embrapa Trigo, localizada sob as coordenadas geográficas 28°11'20" S e 52°19'62" W. No local a altitude é de 691 m, o relevo é suave ondulado e, conforme classificação de Köppen, o clima é o Cfa - subtropical úmido.

Para fins de classificação foi caracterizado um perfil modal, próximo à área experimental, cujas descrições morfológicas e análises físicas e químicas do solo são mostradas no Apêndice 1. Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Embrapa, 2013) tem-se no local um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico. A caracterização física do solo da área experimental, até a profundidade de 0,30 m, encontra-se na Tabela 1.

A área, onde foi implementado o estudo, vinha sendo manejada sob plantio direto há mais de dez anos, em um modelo de produção que compreendia a sucessão das culturas soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão e trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno. O solo desta área

apresentava sinais de degradação estrutural na camada subsuperficial (aproximadamente entre 0,07-0,20 m).

Tabela 1. Argila, silte, areia, argila dispersa em água e densidade de partículas (Dp) do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, em diferentes camadas, na área experimental.

Camada m	Argila -----	Silte kg kg ⁻¹ -----	Areia	ADA kg kg ⁻¹	Dp g cm ⁻³
0,00 - 0,07	0,587	0,207	0,210	0,316	2,67
0,07 - 0,17	0,602	0,196	0,206	0,397	2,72
0,17 - 0,20	0,611	0,196	0,203	0,408	2,74
0,20 - 0,30	0,637	0,188	0,182	0,425	2,74

Uma área de 2.514,5 m² foi dividida em quatro blocos (8 m de comprimento cada). Os blocos foram separados entre si por um espaço (8 m), para manobrar as máquinas agrícolas utilizadas nos tratos culturais durante a condução do estudo. Em cada bloco foram alocadas seis parcelas (43,2 m²). A cada seis meses o solo de uma dessas parcelas foi escarificado, com um escarificador dotado de cinco hastes espaçadas entre si por 0,3 m (Figura 1), até a profundidade aproximada de 0,25 m. Após a escarificação, diferentes espécies vegetais foram introduzidas, a depender da época, sendo: 09/2009 – milho; 03/2010 - trigo; 10/2010 - soja; 03/2011 – centeio (*Secale cereale* L.); 09/2011 – milho.

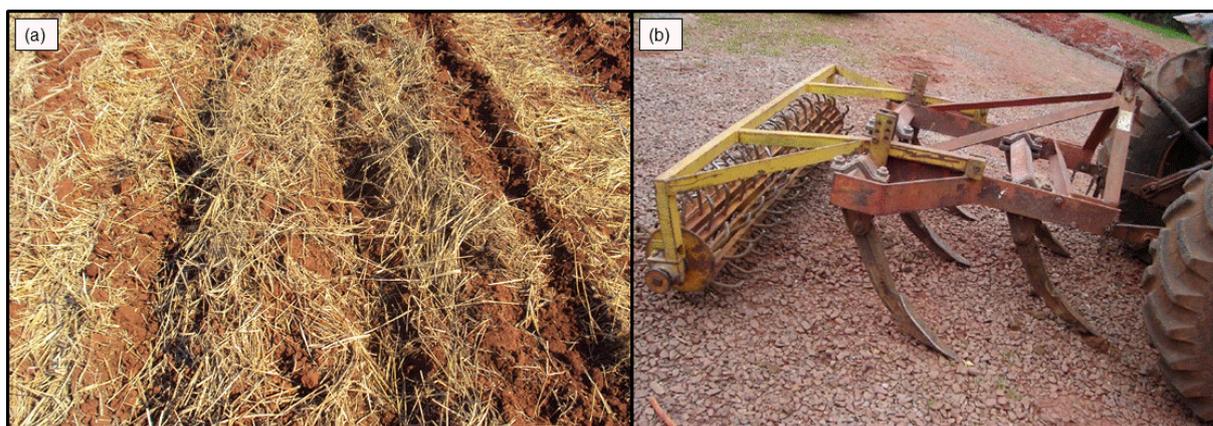


Figura 1. Solo submetido à semeadura de milho imediatamente depois de ser escarificado (a) com um escarificador dotado de cinco hastes espaçadas 0,30 m entre si (b). Coxilha – RS, setembro de 2011. Obs.: anteriormente a cultura do milho a área foi cultivada com centeio.

Os parâmetros relativos ao desenvolvimento das plantas foram avaliados nas plantas do milho semeado em setembro de 2011. Portanto, os tratamentos foram constituídos por seis intervalos de tempo que decorreram desde a escarificação do solo e até a semeadura do milho,

que ocorreu em setembro de 2011, sendo: 0 (Esc 0), 6 (Esc 6), 12 (Esc 12), 18 (Esc 18) e 24 (Esc 24) meses após a escarificação. Uma parcela por bloco não foi escarificada, permanecendo sob plantio direto, sendo considerada a testemunha. O delineamento experimental consistiu em blocos ao acaso com quatro repetições.

As espécies de verão foram semeadas com semeadora dotada de disco liso, haste sulcadora operando até aproximadamente 0,07 m de profundidade (para abrir o sulco de semeadura e posicionar o fertilizante no solo), discos duplos defasados (para posicionar a semente no solo) e roda em forma de “V” (para fechar o sulco de semeadura). Na última safra (09/2011), utilizou-se o milho, cultivar Pioneer 32R48H, e estande final de 70.000 plantas ha⁻¹. A adubação consistiu de 280 kg ha⁻¹ de NPK, fórmula 6-24-18, aplicados na semeadura e 125 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia, aplicados em cobertura.

Coletas e avaliações físicas do solo

Em março de 2012, após a colheita do milho (Figura 2), foram abertas, no sentido transversal às linhas de semeadura, trincheiras medindo 0,3 m de profundidade e 0,6 m de largura, em todas as parcelas. Nestas trincheiras, através da descrição do perfil cultural do solo (Tavares Filho et al., 1999), foram identificadas camadas de solo com estrutura homogênea.



Figura 2. Área experimental, no dia da abertura das trincheiras e amostragem do solo, após a colheita do milho.

Nas parcelas referentes ao tratamento testemunha, foram identificadas três camadas: a camada 0-0,07 m, caracterizada por volume de solo solto e agregados de tamanhos variados, porosidade visível a olho nu e presença de elevada quantidade de raízes; a camada 0,07-0,2 m, caracterizada por volume de solo formando estrutura maciça e homogênea, sem porosidade visível a olho nu e com menor concentração de raízes em relação à camada 0-0,07 m; e a camada 0,2-0,3 m, caracterizada pela aparência de solo com estrutura típica de Nitossolo Vermelho. Para a coleta das amostras, a camada 0,07-0,20 m foi subdividida em duas: 0,07-0,17 m e 0,17-0,20 m. No centro de cada camada foram coletadas três amostras de solo com estrutura preservada (Figura 3), no lado preservado da trincheira, utilizando cilindros de aço inox de 3,0 x 4,8 cm. Nos demais tratamentos seguiram-se as mesmas profundidades de amostragem.

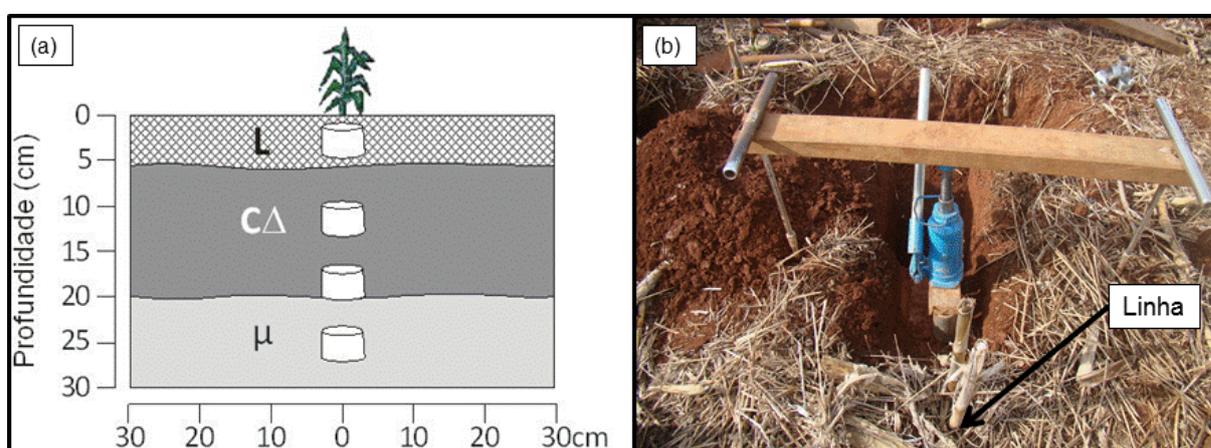


Figura 3. (a) Perfil cultural do Nitossolo Vermelho, no tratamento testemunha; e a posição da coleta das amostras indeformadas. (b) coleta de amostras indeformadas com macaco hidráulico na linha de semeadura do milho. Onde: L = camada de solo com macro e microagregados, porosidade visível a olho nu e abundante presença de raízes; CΔ = camada de solo com estrutura maciça e homogênea, sem porosidade visível a olho nu e menor presença de raízes em relação à camada L; μ = camada de solo com estrutura típica de Nitossolo.

As amostras de solo foram utilizadas para determinar os seguintes atributos físicos do solo: densidade; porosidade (total, macro e micro); resistência à penetração; grau de compactação e água disponível. Depois de coletadas, as amostras foram envoltas em filme plástico; transportadas para o laboratório em caixas sendo os cilindros posicionados horizontalmente para não ocorrer compactação do solo em seu interior; saturadas por capilaridade por 48 horas; equilibradas nas tensões de 1 e 6 kPa, em mesa de tensão, e a 10, 33, 100, 300 e 1.500 kPa em câmaras de pressão de Richards, obtendo-se a umidade para cada tensão. Os dados de umidade volumétrica (θ) foram ajustados à equação de van Genuchten (1980), fazendo uso do Soil Water Retention Curve software version 3.0 beta. Assim obteve-

se a curva de retenção de água ajustada. Pela diferença entre a umidade na capacidade de campo (considerando a tensão de 10 kPa) e a no ponto de murcha permanente (considerando a tensão de 1.500 kPa) calculou-se a água disponível.

A densidade e a porosidade do solo foram determinadas conforme Donagema et al. (2011). A resistência à penetração foi determinada com penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933 marca Marconi (Figura 4a), dotado de variador eletrônico de velocidade e sistema de registro de dados. Assim, após as amostras serem submetidas a todas as tensões, supracitadas, foram novamente saturadas, equilibradas a 10 kPa e submetidas à penetração, realizando-se três penetrações por amostra. O penetrômetro apresenta cone com semi-ângulo de 30° , diâmetro da haste de 3 mm, e a velocidade de penetração foi de 1 cm min^{-1} . As leituras da parte superior (0,3 cm) e inferior (0,3 cm) de cada amostra foram descartadas de forma padronizada, considerando-se somente as leituras dos 2,4 cm centrais de cada amostra.

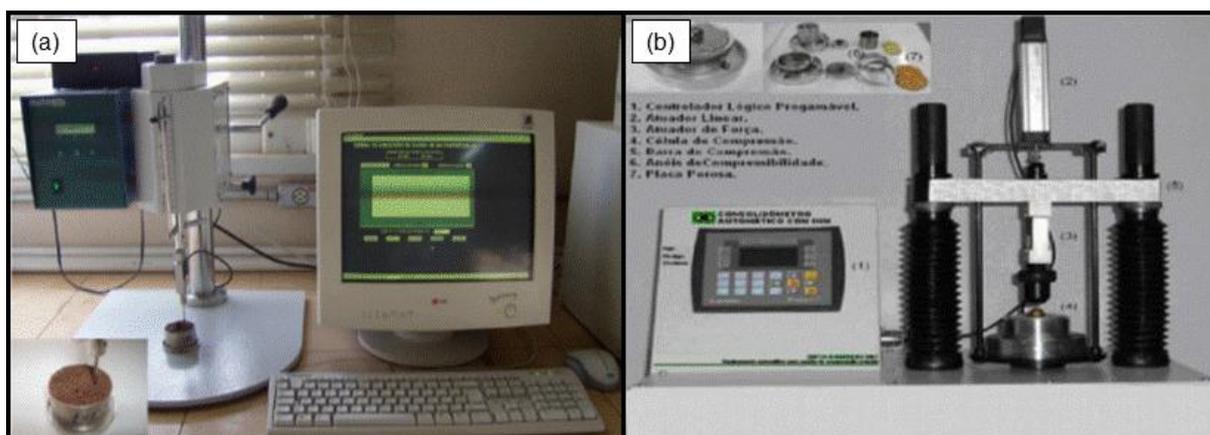


Figura 4. Penetrômetro eletrônico de bancada (a) e o consolidômetro (b) utilizados para determinar a resistência do solo à penetração mecânica e os parâmetros compressivos do Nitossolo Vermelho estudado, respectivamente.

A seguir, as amostras foram submetidas ao teste de compressão uniaxial (Figura 4b). Em cada amostra, subsequentemente aplicou-se as pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa (Silva et al., 2007), e o deslocamento para cada pressão aplicada foi gravado. Em seguida as amostras foram secas a 105° por 24 horas e a densidade foi calculada. Para o cálculo do grau de compactação do solo, foram utilizadas como densidade referência a densidade do solo obtida após a aplicação das pressões de 200, 400 e 800 kPa. Através da relação entre a densidade inicial do solo (no momento da coleta) e os valores de densidade referência obteve-se o grau de compactação do solo, conforme equação 1 (Reichert et al., 2009).

$$Gc (\%) = \frac{Ds \text{ inicial}}{Ds \text{ Referência}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Gc = grau de compactação do solo;

Ds inicial = densidade do solo no momento da coleta;

Ds Referência = densidade do solo após aplicação de 200, 400 ou 800 kPa de pressão.

Avaliação do sistema radicular e do diâmetro de colmo das plantas

O desenvolvimento das plantas foi avaliado através do sistema radicular e do diâmetro de colmo das plantas do milho semeado em setembro de 2011. Quando estas se encontravam no estágio fenológico R3 (Ritchie & Hanway, 1993), coletou-se, com placa de pregos de 0,6 x 0,3 x 0,05 m, um monólito de solo correspondente a nove dm³, por parcela, conforme Bohm (1979). Antes da coleta mediu-se o diâmetro do segundo entrenó acima do solo, em 10 plantas de milho na linha central das parcelas. O diâmetro médio do segundo entrenó das plantas, obtido para cada parcela, serviu de referência para a escolha da planta, da qual foi avaliado o sistema radicular.

Para coletar os monólitos procedeu-se da seguinte forma: (1) abriu-se uma trincheira no sentido transversal à linha de semeadura, sendo a planta deixada no centro (a placa abrangeu 0,3 m de cada lado da planta); (2) cortou-se a planta rente ao solo; (3) alinhou-se a trincheira, com auxílio de uma pá de corte, até a metade do diâmetro do colmo do milho, onde foi posicionada a placa de pregos; (4) com auxílio de um macaco hidráulico os pregos da placa foram completamente introduzidos no perfil do solo; (5) cavou-se ao redor do monólito até que este ficasse solto; (6) após a retirada, emparelhou-se o solo nas dimensões horizontais e verticais da placa e na altura dos pregos; (7) imergiu-se os monólitos em solução de NaOH 0,2 M, onde permaneceram por 24 horas (para dispersar o solo e facilitar a lavagem das raízes); (8) lavou-se o solo com jatos fracos de água, expondo o sistema radicular do milho. A sequência de procedimentos, acima descritos, encontra-se ilustrada na Figura 5.

Durante a lavagem colocou-se sobre o monólito uma tela para evitar o deslocamento das raízes. Após as raízes serem limpas, cada monólito foi dividido em três camadas (0-0,05; 0,05-0,17; 0,17-0,30 m) que corresponde, aproximadamente, as camadas estratificadas pelo perfil cultural do solo sob plantio direto.

As raízes contidas em cada camada foram secas, separadamente, em estufa a 65 °C por 72 horas. Após a secagem, obteve-se a massa de matéria seca de raízes em balança de

precisão 0,0001 g. Pela relação dos valores de massa de matéria seca de raízes e o volume de solo que as raízes ocupavam, obteve-se a densidade radicular em quilogramas de raiz por metro cúbico de solo.



Figura 5. Coleta do sistema radicular do milho. (1) abertura da trincheira; (2) corte da planta rente ao solo; (3) posicionamento da placa de pregos na trincheira; (4) introdução dos pregos no solo; (5) monólito solto; (6) emparelhamento do solo conforme as dimensões da placa e a altura dos pregos; (7) imersão dos monólitos em solução de NaOH; (8) lavagem do solo.

Foram coletadas também amostras de solo deformadas no monólito, nas camadas: 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,30 m, para a determinação das concentrações de fósforo (Mehlich-1), potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial (H+Al) e pH em água. Estas análises foram realizadas conforme Donagema et al. (2011). Os valores médios destes atributos químicos do solo são apresentados na Tabela 2.

No centro das parcelas, mediu-se uma área correspondente a 2,4 m². Nesta área contou-se o número de espigas de milho e estimou-se o número de espigas por hectare. Após a obtenção da massa de grãos de milho na área selecionada e da determinação da umidade dos grãos, corrigiu-se a umidade para 13% e extrapolou-se a produtividade para um hectare.

Tabela 2. Atributos químicos do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, em diferentes camadas, na área experimental. Média de 24 valores.

Camada	pH	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Alumínio	H + Al
m	água	----- mg kg ⁻¹ -----		----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
0,00 - 0,05	5,0	41,9	202,4	3,5	1,5	1,2	9,0
0,05 - 0,10	5,3	29,1	157,3	3,6	1,6	1,1	8,0
0,10 - 0,15	5,4	13,1	134,2	3,9	1,7	0,8	7,0
0,15 - 0,20	5,5	6,6	103,1	3,9	1,9	0,7	6,2
0,20 - 0,30	5,5	2,5	62,4	3,2	1,7	0,8	6,0

Análise estatística

Após a realização da ANOVA, os dados das variáveis: água disponível, densidade do solo, macro, micro, porosidade total, resistência do solo à penetração e densidade radicular das plantas de milho, foram comparados, na mesma camada, pelo teste tukey a 5% de probabilidade. Para o grau de compactação do solo, diâmetro de colmo e produtividade de grãos de milho obteve-se a diferença mínima significativa pelo teste tukey a 5% de probabilidade.

4.4. Resultados e discussão

Primeiramente serão discutidos os resultados referentes aos atributos físicos do solo. Após, inferir a respeito do efeito proporcionado pela escarificação sobre os atributos físicos do solo, serão discutidos os resultados referentes aos parâmetros das plantas de milho.

Parâmetros físicos do solo

A escarificação mecânica do solo proporcionou a melhoria física imediata do solo na camada 0,07-0,20 m, consensualmente citada como degradada em áreas sob plantio direto (Secco et al., 2009; Veiga et al., 2008; Reichert et al., 2009). Os efeitos mais evidentes foram a elevação da porosidade de aeração e a redução da densidade do solo, da resistência do solo à penetração (Tabela 3) e do grau de compactação do solo (Figura 6).

Na camada 0,07-0,17 m, no solo onde o milho foi semeado logo após a escarificação (Esc 0), em comparação ao solo sob plantio direto há mais de 10 anos (testemunha) (PD), houve aumento dos valores de macroporosidade, de 0,08 para 0,15 m³ m⁻³, e diminuição da densidade, de 1,41 para 1,20 g cm⁻³; da resistência à penetração, de 3,12 para 1,21 MPa e do grau de compactação (DRef 200 kPa), de 90,8 para 82,6%. Na camada 0,17-0,20 m ocorreu aumento da macroporosidade (0,06 para 0,12 m³ m⁻³) e diminuição da densidade (1,43 para 1,33 g cm⁻³), resistência à penetração (3,24 para 1,46 MPa) e grau de compactação (DRef 200

kPa) (91,2 para 84,9%) (Tabela 3, Figura 6). Estas diferenças evidenciam o alívio da compactação do solo, na camada 0,07-0,20 m, devido à escarificação do solo, o que se refletiu na disponibilidade de água às plantas, que foi maior no primeiro cultivo após a escarificação do solo (Tabela 4).

Tabela 3. Macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e resistência do solo à penetração mecânica de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, em função de diferentes períodos de escarificação do solo.

Camada (m)	PD ¹	Esc 0	Esc 6	Esc 12	Esc 18	Esc 24	CV%
Macroporosidade do solo (m ³ m ⁻³)							
0,00-0,07	0,20 a ²	0,20 a	0,19 a	0,23 a	0,18 a	0,18 a	26,28
0,07-0,17	0,08 b	0,15 a	0,15 a	0,14 ab	0,10 ab	0,10 ab	23,94
0,17-0,20	0,06 b	0,12 a	0,08 ab	0,09 ab	0,06 b	0,09 ab	30,30
0,20-0,30	0,06 a	0,06 a	0,07 a	0,05 a	0,05 a	0,07 a	25,43
Microporosidade do solo (m ³ m ⁻³)							
0,00-0,07	0,38 a	0,36 a	0,37 a	0,34 a	0,37 a	0,39 a	7,19
0,07-0,17	0,40 a	0,38 a	0,36 a	0,36 a	0,39 a	0,42 a	10,3
0,17-0,20	0,41 a	0,38 a	0,40 a	0,40 a	0,41 a	0,39 a	5,09
0,20-0,30	0,42 a	0,42 a	0,43 a	0,44 a	0,43 a	0,42 a	4,31
Porosidade total do solo (m ³ m ⁻³)							
0,00-0,07	0,59 a	0,56 a	0,56 a	0,57 a	0,55 a	0,57 a	7,61
0,07-0,17	0,48 a	0,52 a	0,51 a	0,50 a	0,49 a	0,52 a	9,37
0,17-0,20	0,46 a	0,50 a	0,48 a	0,48 a	0,46 a	0,47 a	3,54
0,20-0,30	0,48 a	0,48 a	0,50 a	0,49 a	0,48 a	0,48 a	0,05
Densidade do solo (g cm ⁻³)							
0,00-0,07	1,06 a	1,11 a	1,10 a	1,05 a	1,19 a	1,18 a	7,74
0,07-0,17	1,41 a	1,20 c	1,22 c	1,24 bc	1,34 a	1,33 ab	3,12
0,17-0,20	1,43 a	1,33 a	1,34 a	1,35 a	1,40 a	1,35 a	4,61
0,20-0,30	1,36 a	1,34 a	1,28 a	1,35 a	1,35 a	1,35 a	4,15
Resistência do solo à penetração mecânica (MPa)							
0,00-0,07	0,97 a	1,06 a	0,97 a	0,92 a	1,04 a	1,07 a	36,5
0,07-0,17	3,12 a	1,21 c	1,66 bc	1,89 abc	2,36 abc	2,84 ab	28,39
0,17-0,20	3,24 a	1,46 c	1,95 bc	3,29 a	3,16 ab	2,99 ab	20,98
0,20-0,30	2,65 a	2,36 a	2,31 a	2,65 a	3,19 a	2,81 a	10,05

¹ Solo manejado sob plantio direto a mais de 10 anos (PD) e solo onde o milho foi semeado após decorrer 0 (Esc 0), 6 (Esc 6), 12 (Esc 12), 18 (Esc 18) e 24 (Esc 24) meses da escarificação. ² Letras iguais na mesma linha indicam que não há diferença estatística pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A ação mecânica das hastas escarificadoras rompe o solo nas zonas de maior friabilidade e promove melhorias no solo, tais como: melhor distribuição do diâmetro de poros; aumento da porosidade total; aumento da rugosidade superficial; aumento da capacidade de infiltração de água; e diminuição da densidade e da resistência do solo à penetração. A hipótese de que a escarificação do solo em plantio direto proporciona melhores condições físicas ao solo já foi

comprovada (Araujo et al., 2004; Camara & Klein, 2005; Collares et al., 2008; Klein et al., 2008; Klein et al., 2009; Secco et al., 2009; Prando et al., 2010; Silva et al., 2012), estando de acordo, portanto, com o presente estudo.

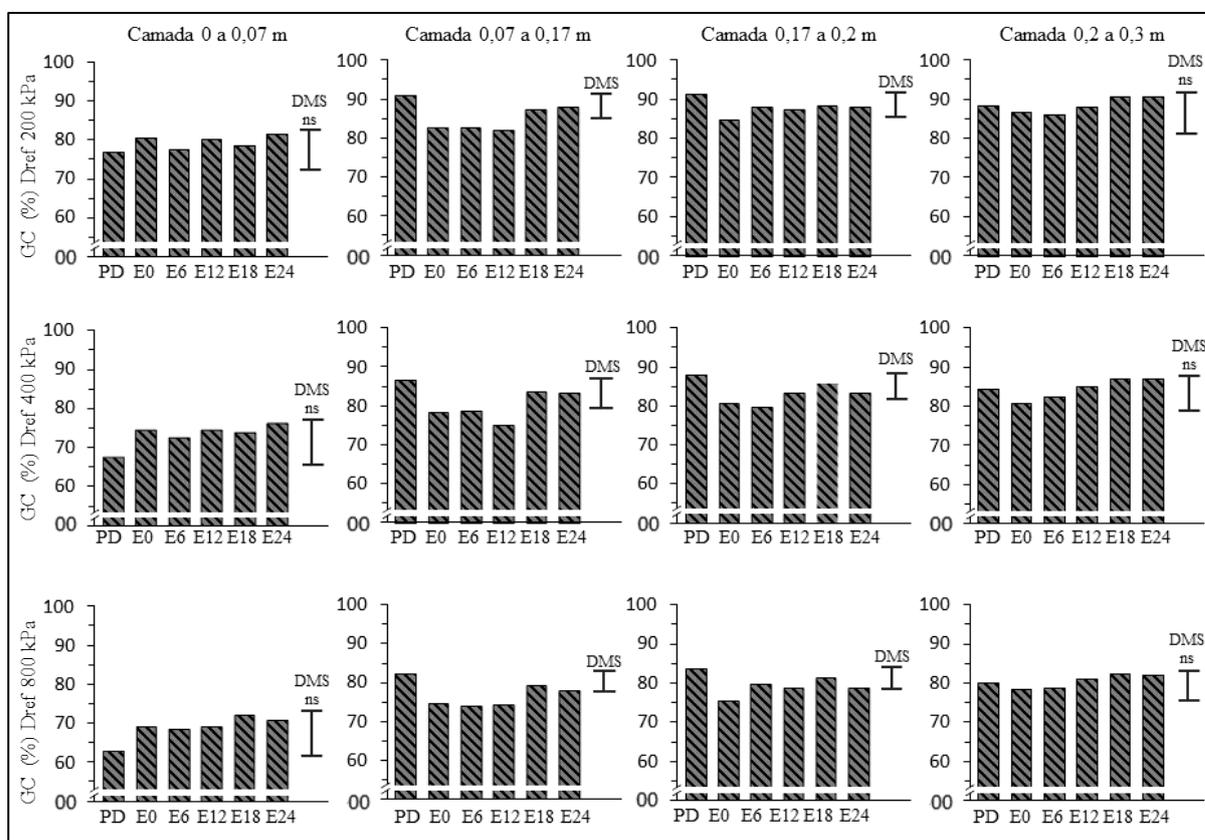


Figura 6. Grau de compactação (G_C) em função da densidade referência obtida com aplicação das pressões 200 kPa (Dref 200 kPa), 400 kPa (Dref 400 kPa) e 800 kPa (Dref 800 kPa) em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico manejado há mais de 10 anos em plantio direto (PD) e onde a semeadura do milho foi realizada após decorridos 0 (E0), 6 (E6), 12 (E12), 18 (E18) e 24 (E24) meses da escarificação do solo. Barras verticais indicam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Tabela 4. Água disponível do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico em diferentes camadas.

Camada	PD ¹	Esc 0	Esc 6	Esc 12	Esc 18	Esc 24	CV
m	m ³ m ⁻³						%
0-0,07	0,076 a	0,076 a	0,066 a	0,065 a	0,066 a	0,073 a	21,81
0,07-0,17	0,048 b	0,063 a	0,059 a	0,050 b	0,048 b	0,055 b	12,46
0,17-0,20	0,049 b	0,065 a	0,057 ab	0,060 ab	0,055 b	0,055 ab	14,35
0,20-0,30	0,064 a	0,064 a	0,062 a	0,060 a	0,067 a	0,077 a	18,07

¹ solo manejado em há mais de 10 anos em plantio direto (PD) e solo escarificado a 0 (Esc 0), 6 (Esc 6), 12 (Esc 12), 18 (Esc 18) e 24 (Esc 24) meses da escarificação. Letras iguais na mesma linha significa que não há diferença estatística significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os estudos que evidenciam que os efeitos da escarificação de Latossolos sob plantio direto proporcionam diminuição da resistência do solo à penetração (Collares et al., 2008) e da densidade do solo e aumento da condutividade hidráulica e da taxa de infiltração de água no solo (Câmara & Klein, 2005), são de duração inferior a um ano. Estes estudos, portanto, não permitem concluir que a prática é eficaz, em longo prazo, em melhorar a conservação do solo e da água.

Na camada 0,07-0,17 m, no presente estudo, após 12 meses da escarificação (Esc 12) o efeito da prática mecânica na resistência do solo à penetração, macroporosidade (Tabela 3) e disponibilidade de água às plantas (Tabela 4), praticamente desapareceu, uma vez que os valores destas variáveis não diferem estatisticamente daqueles observados no solo manejado sob plantio direto há mais de 10 anos (testemunha). Sobre a densidade (Tabela 3) e o grau de compactação do solo (Figura 6), o efeito foi anulado durante o desenvolvimento do milho semeado após 18 meses da escarificação (Esc 18). Nesta camada, portanto, o efeito oriundo da escarificação mecânica do solo mostrou-se efêmero, inferior a 24 meses.

Em maior profundidade, na camada 0,17-0,20 m, o efeito mostrou-se ainda mais efêmero, sendo completamente anulado durante o desenvolvimento do milho semeado no solo escarificado há seis meses (Esc 6) (Tabela 3 e 4; Figura 6). Nesta camada a escarificação proporcionou melhoria física ao solo apenas para as plantas que se desenvolveram na primeira safra após a realização da prática, ou seja, imediatamente após a escarificação (Esc 0).

O efeito efêmero da escarificação também foi mencionado por Da Rosa et al. (2008), Veiga et al. (2008), Colonego & Rosolem (2010), Silva et al. (2012) e Drescher et al. (2012). Câmara & Klein (2005) observaram que a porosidade (macro, micro e total) de um Latossolo Vermelho escarificado há seis meses ou manejado sob plantio direto é similar. Nicolosso et al. (2008) constataram que a persistência dos efeitos proporcionados pela escarificação em um Latossolo Vermelho sob plantio direto, foi inferior a nove meses. A efemeridade foi atribuída ao emprego isolado da prática mecânica para descompactar o solo. No mesmo estudo, quando imediatamente após a escarificação foram introduzidas plantas de cobertura - aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) e nabo-forageiro (*Raphanus sativus* L.) - o efeito se prolongou, fato atribuído à presença de raízes no solo escarificado.

A persistência do efeito da escarificação do solo depende da cultura estabelecida, do manejo adotado e do regime de chuvas após a realização da prática (Nicolosso et al., 2008). Em anos chuvosos o solo tende a se recomodar rapidamente diminuindo a persistência dos efeitos da escarificação (Nicolosso et al., 2008; Veiga et al., 2008; Silva et al., 2012).

A precipitação pluvial no Rio Grande do Sul atinge 1.800 mm, distribuídos regularmente durante o ano (Nimer, 1989). Este elevado índice de chuvas contribui para a efemeridade dos efeitos da escarificação do solo, por propiciar constantes ciclos de umedecimento e secagem, do solo levando a expansão e contração do solo. Silva et al. (2012) atribuíram a efemeridade dos efeitos da escarificação a resiliência do solo, que conforme eles, também está relacionada aos ciclos de umedecimento e secagem do solo. Estes autores concluíram que após seis meses da escarificação de um Latossolo, não há mais efeitos positivos sobre a densidade e o grau de compactação do solo na camada 0,10-0,20 m, e que um possível efeito benéfico proporcionado em superfície, pela técnica, aumenta o risco de compactação em subsuperfície.

A efemeridade dos efeitos da escarificação pode estar relacionada à degradação do carbono e da estrutura do solo devido à prática mecânica (Fabrizzi et al., 2009). A escarificação eleva a porosidade de aeração do solo e, assim deixa o ambiente favorável à oxidação do carbono orgânico que tende a diminuir no solo escarificado, em relação ao solo sob plantio direto (Araujo et al., 2004; Omonode et al., 2006). Isto diminui a estabilidade estrutural do solo.

Conforme Colonego & Rosolem (2008), as hastes escarificadoras rompem a estrutura do solo, e assim o manejo mecânico da compactação na ausência de plantas de cobertura promove a redução da estabilidade dos agregados. Drescher et al. (2012) também relatam que a mobilização do solo sob plantio direto pode contribuir para a deterioração da estrutura do solo, devido a diminuição da resistência dos agregados. Em solos muito compactados, isto pode resultar em solo menos estável e mais suscetível a uma subsequente compactação mais intensa (Canarache et al., 2000).

Salienta-se ainda, que em todas as camadas do solo em estudo, o conteúdo de argila é próximo a $0,60 \text{ kg kg}^{-1}$ (Tabela 1). Solos argilosos, em relação aos arenosos, podem reter mais água, o que, em função do tipo, formato e tamanho dos argilominerais, predispõe o solo a atingir um estado de compactação mais elevado (Bodman & Constantin, 1966) após a escarificação, como observado por Silva et al. (2012).

Assim, a hipótese de que a escarificação mecânica do solo, para remediar restrições físicas impostas pela camada subsuperficial do solo sob plantio direto, têm efeito efêmero, previamente formulada, foi confirmada. Esta técnica, portanto, proporciona efeitos pouco duradouros e não contribui para a melhoria efetiva da estrutura do solo em plantio direto.

Parâmetros de planta

Ao proporcionar efeitos imediatos sobre os atributos físicos do solo, a escarificação favoreceu o desenvolvimento das plantas. Em comparação às plantas que se desenvolveram no solo sob plantio direto há mais de 10 anos, as plantas cultivadas no solo escarificado a 0 (Esc 0) e 6 meses (Esc 6) apresentaram maiores valores de densidade radicular (Tabela 5). A densidade radicular por planta de milho, passou de 0,98 (PD) para 1,27 (Esc 0) e 1,13 kg m⁻³ (Esc 6). Ao se observar os dados de densidade radicular na camada 0,05-0,17 m, onde o solo apresentou melhores condições físicas imediatamente após a sua escarificação, nota-se que os valores médios desta variável passaram de 0,70 (PD) para 1,12 (Esc 0) e 0,98 kg m⁻³ (Esc 6) (Tabela 5). Assim, a maior densidade radicular deve-se ao maior desenvolvimento radicular na camada 0,05-0,17 m, que foi favorecido pela escarificação do solo.

Tabela 5. Densidade radicular das plantas de milho semeado em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico manejado há mais de 10 anos sob plantio direto e após decorrer 0 (Esc 0), 6 (Esc 6), 12 (Esc 12), 18 (Esc 18) e 24 (Esc 24) meses de sua escarificação.

Camada	PD	Esc 0	Esc 6	Esc 12	Esc 18	Esc 24	CV
m	----- kg m ⁻³ -----						%
0,00-0,05	3,580 a ¹	4,262 a	3,882 a	3,662 a	4,311 a	4,287 a	8,19
0,05-0,17	0,700 c	1,120 a	0,980 ab	0,830 bc	0,710 c	0,710 c	07,92
0,17-0,30	0,200 a	0,270 a	0,220 a	0,250 a	0,230 a	0,210 a	30,38
Total	0,980 c	1,270 a	1,130 b	1,040 bc	1,100 b	1,070 bc	4,35

¹ Letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Em relação ao diâmetro de colmo das plantas de milho (Figura 7), não foi observada diferença estatística significativa entre os tratamentos. Nota-se, porém, que há uma tendência de aumento no diâmetro do colmo das plantas do milho cultivado no solo escarificado a 0 (Esc 0) e 6 meses (Esc 6), em comparação às plantas do milho semeado em solo sob plantio direto (PD). Em face do melhor desenvolvimento radicular e do engrossamento do colmo das plantas de milho, pode-se dizer que a escarificação do solo, ao proporcionar a melhoria física imediata ao solo, possibilita melhor desenvolvimento das plantas de milho nos dois primeiros cultivos depois do manejo mecânico da compactação do solo em plantio direto.

A compactação do solo afeta o desenvolvimento das plantas (Beutler & Centurion, 2004; Freddi et al., 2007; Collares et al., 2008; Secco et al., 2009; Bergamin et al., 2010). Assim, a melhoria física imediata no solo da camada 0,07-0,17 m, devido sua escarificação, favoreceu

o desenvolvimento das plantas, levando ao aumento da densidade radicular e do diâmetro de colmo nos dois primeiros cultivos após a realização da prática (Esc 0 e Esc 6).

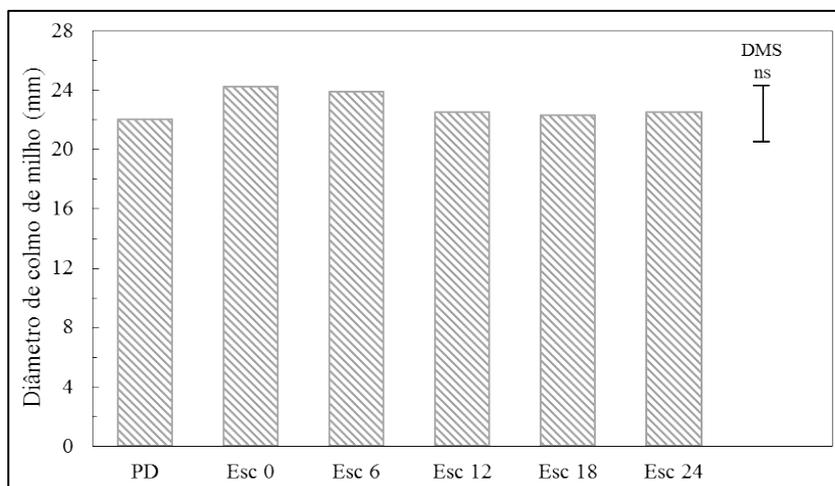


Figura 7. Diâmetro do colmo do milho semeado em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto por 10 anos (PD) e após decorrer 0 (Esc 0), 6 (Esc 6), 12 (Esc 12), 18 (Esc 18) e 24 (Esc 24) meses de sua escarificação. Barras verticais representam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade; ns = não significativo.

Assim, como neste estudo, na literatura há relatos de que o manejo mecânico do solo sob plantio direto favorece o crescimento das plantas. Corsini & Ferraudo (1999) observaram que, em camadas estruturalmente estabilizadas de um Latossolo mantido por longo período sob plantio direto, os efeitos imediatos das operações de subsolagem e aração mais gradagem do solo, proporcionaram, no primeiro ano agrícola após as operações, aumento do potencial de desenvolvimento radicular de milho. Porém, os efeitos do manejo mecânico da compactação do solo no desenvolvimento de plantas se mostraram efêmeros. Nas plantas de milho que se desenvolveram no solo escarificado há mais de 12 meses, neste estudo, os efeitos da escarificação do solo não persistiram (Tabela 5 e Figura 7). É possível afirmar, portanto, que seu efeito sobre o desenvolvimento das plantas de milho é pouco duradouro.

Estudos desenvolvidos no sentido de avaliar os efeitos da escarificação do solo no crescimento de plantas, com duração superior a um ano, também, apontam para a efemeridade desta ação. Prando et al. (2010), em um Nitossolo Vermelho sob três sistemas de rotação de culturas em solo sob plantio direto, com e sem escarificação inicial, observaram que no primeiro ano as plantas cultivadas no solo escarificado apresentaram maior desenvolvimento radicular nas camadas mais profundas (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m). No segundo ano, porém, não houve diferença no desenvolvimento radicular das plantas no solo com e sem escarificação.

O maior desenvolvimento das raízes do milho, nas primeiras safras após a escarificação do solo (Tabela 5), não resultou em maior produtividade de grãos (Figura 8). Na literatura nota-se divergência a respeito do assunto: para Secco et al. (2004), a escarificação anual ou a cada três anos de um Latossolo sob plantio direto não altera significativamente a produção de soja e milho; já Secco et al. (2009), observaram que a escarificação de dois Latossolos em plantio direto, promoveu aumento no rendimento de grãos de milho e de trigo em relação ao solo sob plantio direto, na primeira safra após a intervenção mecânica. Klein et al. (2008) observaram que a escarificação de um Latossolo Vermelho há seis anos sob plantio direto aumentou o rendimento de grãos de trigo semeado sete meses após a prática. Já Klein & Camara (2007) relatam que a escarificação de um Latossolo Vermelho, embora melhorasse a condição física do solo, não aumentou o rendimento de soja em relação ao solo não escarificado.

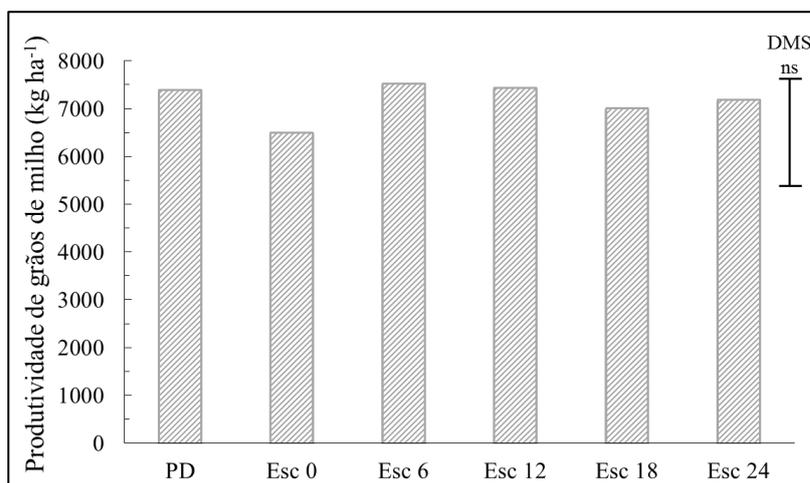


Figura 8. Produtividade de milho semeado em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto há mais de 10 anos (PD) e após decorrer 0 (Esc 0), 6 (Esc 6), 12 (Esc 12), 18 (Esc 18) e 24 (Esc 24) meses da escarificação. Barras verticais representam a diferença mínima significativa (DMS) pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ns = não significativo.

A divergência entre autores quanto à produtividade das culturas que se desenvolvem em solo escarificado decorre do fato da produtividade de uma planta não ser função apenas do solo, tampouco somente das suas condições físicas. O sistema agrícola produtivo depende dos fatores clima, planta e solo (água, calor, oxigênio, permeabilidade, pH e nutrientes). Portanto, como observado neste estudo (Figura 8), a melhor condição física do solo pode não resultar em maior produtividade das plantas cultivadas sobre este solo.

Neste sentido, Collares et al. (2008) observaram que a escarificação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto promoveu a diminuição das restrições ao crescimento radicular e

maior área foliar e altura de plantas de feijão, cultivadas após a operação. Porém, relatam que a produtividade desta cultura não foi afetada, ocorrendo inclusive, tendência de redução de produtividade no solo escarificado em relação ao solo sob plantio direto. Para Derpsch et al. (1986), em Latossolo, a produtividade de trigo e soja foi maior em plantio direto que no cultivo mínimo (escarificação) e no preparo convencional do solo (arado de disco e grade). Conforme estes autores, o plantio direto combinado com culturas de cobertura em rotação representa um sistema de produção eficiente em aumentar o rendimento das culturas.

A adoção de um modelo de produção que envolva plantas de sistema radicular agressivo pode promover a agregação do solo (Silva & Rosolem, 2001). Plantas como milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e centeio possuem sistema radicular com elevado potencial para se desenvolverem em solos compactados (Rosolem et al., 2002; Williams & Weil, 2004). Quando o sistema radicular destas plantas se decompõe deixa canais no solo, possibilitando o aprofundamento das raízes das plantas cultivadas em sequência (Williams & Weil, 2004; Colonego e Rosolem, 2010).

Portanto, considerando que os efeitos da escarificação do solo sobre os atributos físicos do solo, desenvolvimento radicular e diâmetro de colmo das plantas de milho, foram efêmeros e que a prática mecânica não afetou a produtividade do milho, a escarificação do solo para promover sustentabilidade ao sistema agrícola produtivo, não se justifica. Esta afirmação está em acordo com Colonego & Rosolem (2010), que observaram que as condições físicas do solo escarificado a três anos e do solo sob plantio direto são semelhantes.

4.5. Conclusões

A técnica da escarificação mecânica do solo promoveu efeitos positivos sobre os atributos físicos do solo - macro, micro e porosidade total, densidade, grau de compactação e disponibilidade de água as plantas - e sobre o desenvolvimento de plantas de milho - diâmetro de colmo e densidade radicular - os quais desapareceram em menos de 24 meses e não afetou a produtividade de milho. Esta técnica, portanto, não proporciona melhorias efetivas na estrutura do solo em plantio direto, na Região Subtropical Brasileira.

4.6. Referências bibliográficas

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférrico após treze anos de semeadura direta. R. Bras. Ci. Solo, 28:495-504, 2004.

- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:681-691, 2010.
- BERTOLINI, E. V.; GAMERO, C. A. Demanda energética e produtividade da cultura do milho com adubação, de pré-semeadura em dois sistemas de manejo do solo. *R. Energia na Agricultura*, 25:01-23, 2010.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:581-8, 2004.
- BODMAN, G.B.; CONSTANTIN, G.K. Influence of particle sizes distribution in soil compaction. *Hilgardia*, 36:567-91, 1966.
- BOHM, W. *Methods of studying root systems*. New York: Springer-Verlag, 1979.
- CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:789-796, 2005.
- CANARACHE, A.; HORN, R.; COLIBAS, I. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil Till. Res.*, 56:185-196, 2000.
- CHEN, G.; WEIL, R.R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil Till. Res.*, 117:17-27, 2011.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008.
- COLONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1399-1407, 2008.
- COLONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *Eur. J. Agron.*, 33:242-249, 2010.
- CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:289-298, 1999.
- Da ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I.; VIEIRA, D.A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:395-400, 2008.
- De MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.
- DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; BACALTCHUK, B.; SATTTLER, A.; DENARDIN, N.D'A.; FAGANELLO, A.; WIETHÖLTER, S. Sistema plantio direto: fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.G. *Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas*. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 1, 1251-1273, 2008.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A. 15 de abril dia nacional da conservação do solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não? Bol. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo, 36:10-15, 2011.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2010.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. Soil Till. Res., 8:253-263, 1986.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G.L. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 36:1836-1884, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ed. Rio de Janeiro, 306p., 2013.

FABRIZZI, K.P.; RICE, C.W.; AMADO, T.J.C.; FIORIN, J.; BARBAGELATA, P.; MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: Effect of native and agroecosystems. Biogeochemistry, 92:129-143, 2009.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, M.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. Bragantia: R. Ci. Agrônômicas, 66:477-486, 2007.

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho Distrófico típico sob plantio direto escarificado. Ci. Rural, 39:2475-2481, 2009.

KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. R. Bras. Ci. Solo, 31:221-227, 2007.

KLEIN, V.A.; VIEIRA, M.L.; DURIGON, F.F.; MASSING, J.P.; FÁVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. Ci. Rural, 38:365-371, 2008.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. R. Bras. Ci. Solo, 32:1723-1734, 2008.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. 2.ed. Rio de Janeiro, IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. 442p.

OMONODE, R.A.; GAL, A.; STOTT, D.E.; ABNEY, T. S.; VYN, T.J. Short-term versus continuous chisel and no-till effects on soil carbon and nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J., 70:419-425, 2006.

PRANDO, M.B.; OLIBONE, D.; OLIBONE, A.P.E.; ROSOLEM, C.A. Infiltração de água no solo sob escarificação e rotação de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:693-700, 2010.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242-254, 2009.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. How a corn plant develops. Ames: Iowa University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 21 p, 1993. (Special Report 48).

ROSOLEM, C.A; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil Till. Res.*:65, 109-115, 2002.

SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ci. Rural*, 39:58-64, 2009.

SECCO, D.; REINERT, D.R.; REICHERT, J.M.; ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:797-804, 2004.

SILVA, R.B., MASQUETTO, B.J., LANÇAS, K.P. Desenvolvimento e automação de um consolidômetro com interface homem máquina. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Gramado. Conquistas e Desafios da Ciência do Solo Brasileira. SBCS, Viçosa, 2007.

SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:253-260, 2001.

SILVA, S.G.C.; SILVA, A.P; GIAROLA, N.F.B; TORMENA, C.A.; SÁ, J.C.M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:547-555, 2012.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian oxisols under no-tillage. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:35-43, 2009.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:393-99, 1999.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.

Van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.

VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a Southern Brazilian Hapludox. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1437-1446, 2008.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:1403-1409, 2004.

5. ARTIGO II: Semeadora com haste sulcadora de ação profunda: potencial mitigador da degradação estrutural do solo sob plantio direto

5.1. Resumo

A adoção do plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil, fundamentada apenas em dois preceitos da agricultura conservacionista - mobilização de solo restrita à linha de semeadura e manutenção de resíduos culturais na superfície do solo - tem induzido à degradação física da camada subsuperficial do solo, aproximadamente 0,07-0,20 m, contribuindo para frustrações de safras agrícolas quando da ocorrência de estiagens. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de uma semeadora equipada com haste sulcadora, atuando em três profundidades, na mitigação da degradação da estrutura de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto há mais de 10 anos. Semeou-se milho (*Zea mays* L.), utilizando uma semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo haste sulcadora ajustada para atuar em três profundidades, as quais constituíram os tratamentos: T₁ = hastes sulcadoras atuando até 0,05 m de profundidade; T₂ = hastes sulcadoras atuando até 0,07 m de profundidade; e T₃ = hastes sulcadoras atuando até 0,17 m de profundidade. O efeito desses tratamentos foi avaliado pela determinação de atributos físicos do solo – densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, resistência do solo à penetração, grau de compactação e disponibilidade de água às plantas - e do desenvolvimento de plantas de milho - aprofundamento de raiz, massa de matéria seca de raiz, densidade e comprimento radicular e diâmetro de colmo. A utilização da semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo haste sulcadora atuando a 0,17 m de profundidade apresentou potencial para mitigar a degradação estrutural do solo, promovendo melhorias nos atributos físicos do solo, o que proporcionou melhor desenvolvimento das plantas de milho em comparação aos demais tratamentos testados.

5.2. Introdução

A partir dos anos 1960, a aplicação de elevadas doses de corretivos e fertilizantes aliada ao revolvimento intenso do solo, possibilitou o uso, em larga escala, dos Latossolos e Nitossolos da Região Subtropical Úmida do Brasil. Estas práticas contribuíram para a degradação física do solo, sendo que a camada arável destes solos passou a apresentar duas camadas distintas: uma superficial, dispersa e porosa, e outra subsuperficial, compactada e de baixa permeabilidade ao ar e à água. Com isso, a erosão hídrica do solo passou a ser intensa (Borges, 1997).

Para diminuir a erosão, a partir da década de 1970, o plantio direto passou a ser adotado na região (Casão Jr. et al., 2012). Esta técnica alternativa de preparo reduzido de solo, para ser viável de forma contínua, precisava ser praticada como um sistema de manejo. Em meados dos anos 1980, após esta percepção, surgiu a expressão sistema plantio direto, que passou a contemplar um conjunto de preceitos da agricultura conservacionista, destinado à exploração de sistemas agrícolas produtivos, tais como: mobilização de solo apenas na linha de semeadura ou de plantio; manutenção de resíduos culturais na superfície do solo; diversificação de espécies via rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas; redução ou supressão do intervalo de tempo entre a colheita e a semeadura subsequente; manutenção da cobertura permanente de solo e aporte ao solo de material orgânico em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo (Denardin et al., 2011).

Estes preceitos, entretanto, não são plenamente adotados e o que se observa em áreas sob plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil, é um solo estratificado química e fisicamente (Selles et al., 1997; Veiga et al., 2008; Reichert et al., 2009). Na camada 0-0,07 m são observados baixos valores de resistência à penetração e de densidade do solo e elevada permeabilidade e fertilidade química. Por outro lado, na camada 0,07-0,20 m, a densidade do solo e a resistência à penetração são elevadas e a aeração, fluxo de água e ar e fertilidade química são baixos.

A degradação física do solo, nestas áreas, deve-se à compactação do solo mediante tráfego de máquinas e pisoteio animal (Hamza & Anderson, 2005; Veiga et al., 2007; Batey, 2011), ao aporte insuficiente de material orgânico no solo (Soane et al., 1981; Derpsch et al., 1986) e à formação de uma camada compactada, provavelmente formada durante a época em que o solo sofria preparo convencional (pé-de-arado), e que foi posteriormente herdada por ocasião da implantação do plantio direto (Casão Jr. et al., 2012, Tavares Filho et al., 2001).

Estas condições físicas e químicas do solo sob plantio direto contribuem para que o sistema radicular das culturas se concentre na camada superficial do solo (Reichert et al., 2009). A compactação do solo modifica o desenvolvimento, a morfologia e a fisiologia das raízes levando à diminuição do volume de solo explorado (Batey, 2011; Unger et al., 1994). Em consequência, a absorção de água e nutrientes diminui, afetando a produtividade das plantas (Chen & Weil, 2011).

A camada subsuperficial degradada limita a ascensão de água do subsolo para a camada superficial (Silva et al., 2009), onde o sistema radicular se concentra, levando à manifestação do estresse hídrico mesmo em períodos curtos de estiagens. Assim, ao longo de 35 anos da

adoção do plantio direto no Rio Grande do Sul, as frequentes frustrações de safras podem estar relacionadas a essa degradação física do solo em plantio direto (Denardin et al., 2008).

Para a semeadura das culturas de verão, em plantio direto, utiliza-se semeadoras-adubadoras equipadas com haste sulcadora, discos desencontrados e disco de corte (Casão Jr. et al., 2012), que mobilizam o solo na linha de semeadura. Porém, a profundidade de ação destes elementos é inferior àquela onde se encontra a camada compactada. Estas máquinas, portanto, depositam o fertilizante acima da camada degradada sem contribuir para o aprofundamento do sistema radicular das plantas e para o alívio da compactação do solo (Denardin et al., 2008).

A utilização de semeadoras para plantio direto equipadas com hastes sulcadora de ação profunda (0,17 m), ao contrário de discos lisos e de hastes sulcadoras que atuam a 0,05 e 0,07 m de profundidade, pode contribuir para mitigar a degradação física do solo da camada subsuperficial. Isto poderia proporcionar melhores condições para o desenvolvimento das raízes das plantas em profundidade e diminuição dos riscos de frustrações de safra por déficit hídrico.

Assim, este estudo tem por objetivo avaliar o efeito de uma semeadora equipada com haste sulcadora atuando em três profundidades, na mitigação da degradação da estrutura de um Nitossolo Vermelho manejado há mais de 10 anos sob plantio direto, mediante a determinação de atributos físicos do solo e do desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays* L.).

5.3. Material e métodos

Área e delineamento experimental

O experimento foi conduzido no campo experimental da Embrapa Trigo (28°11'20'' S, 52°19'62'' W), a 691 m de altitude. Na região, o relevo é suave ondulado e o clima, conforme classificação de Köppen, é o Cfa - subtropical úmido. O solo na área experimental foi classificado como Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico (Embrapa 2013). A caracterização física dos primeiros 0,3 m do perfil do solo na área experimental é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico na área experimental.

Camada (m)	Argila ----- kg kg ⁻¹ -----	Silte kg kg ⁻¹	Areia -----	ADA kg kg ⁻¹	Dp g cm ⁻³
0,00-0,07	0,600	0,193	0,212	31	2,68
0,07-0,17	0,590	0,204	0,209	36	2,73
0,17-0,20	0,612	0,190	0,207	35	2,75
0,20-0,30	0,672	0,166	0,171	42	2,73

ADA = argila dispersa em água; Dp = densidade de partículas.

Nos 10 anos antecedentes à implementação do estudo a área foi manejada sob plantio direto, em um modelo de produção que compreendia a sucessão das culturas de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão e de trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno. A partir do início do estudo, em 2009, passou-se a utilizar soja e milho no verão e trigo e centeio (*Secale cereale* L.) no inverno, na seguinte ordem: 09/2009 milho; 03/2010 trigo; 10/2010 soja; 03/2011 centeio; 09/2011 milho.

As culturas de verão foram semeadas com uma semeadora para plantio direto (Figura 1a e 1b), equipada com disco liso, haste sulcadora ajustável para operar até 0,17 m de profundidade (Figura 1c e 1d), para abrir o sulco de semeadura e posicionar o fertilizante no solo, discos duplos defasados, para posicionar a semente no solo, e roda em forma de “V”, para fechar o sulco de semeadura. Os tratamentos foram constituídos pelas profundidades de ação das hastes sulcadoras da semeadora, quais sejam: T₁ = haste sulcadora agindo até 0,05 m de profundidade; T₂ = haste sulcadora agindo até 0,07 m de profundidade; T₃ = haste sulcadora agindo até 0,17 m de profundidade. Os tratamentos T₁ e T₂ representam a profundidade de ação dos elementos rompedores de solo tipicamente utilizada pelos produtores na Região Subtropical Úmida do Brasil. O delineamento experimental consistiu em blocos ao acaso, com quatro repetições. Cada unidade experimental correspondeu a 43,2 m² (8,0 x 5,4 m).

Na safra implantada em 09/2011, utilizou-se o milho cultivar Pionner 32R48H, com estande final de 70.000 plantas ha⁻¹. A adubação consistiu de 280 kg ha⁻¹ de NPK fórmula 6-24-18, aplicados na semeadura e 125 kg ha⁻¹ de N, aplicados em cobertura e na forma de uréia.

Amostragem do solo e avaliações físicas

Em março de 2012, após a colheita do milho semeado em setembro de 2011, foram abertas, no sentido transversal às linhas de semeadura, trincheiras medindo 0,3 m de profundidade e 0,6 m de largura. Nestas trincheiras, através da descrição do perfil cultural do solo (Tavares Filho et al., 1999), foram identificadas camadas de solo com estrutura homogênea.

No perfil de 0-0,3 m de profundidade, nos tratamentos T₁ e T₂ (testemunha), foram identificadas três camadas distintas: camada 0-0,07 m, caracterizada por volume de solo solto e agregados de tamanhos variados, porosidade visível a olho nu e presença de elevada quantidade de raízes; camada 0,07-0,2 m, caracterizada por volume de solo formando estrutura maciça e homogênea e agregados compactos, sem porosidade visível a olho nu e com menor concentração de raízes, em relação à camada superficial; e camada 0,2-0,3 m, caracterizada pela aparência de solo com estrutura típica de Nitossolo Vermelho não compactado (Figura 2).

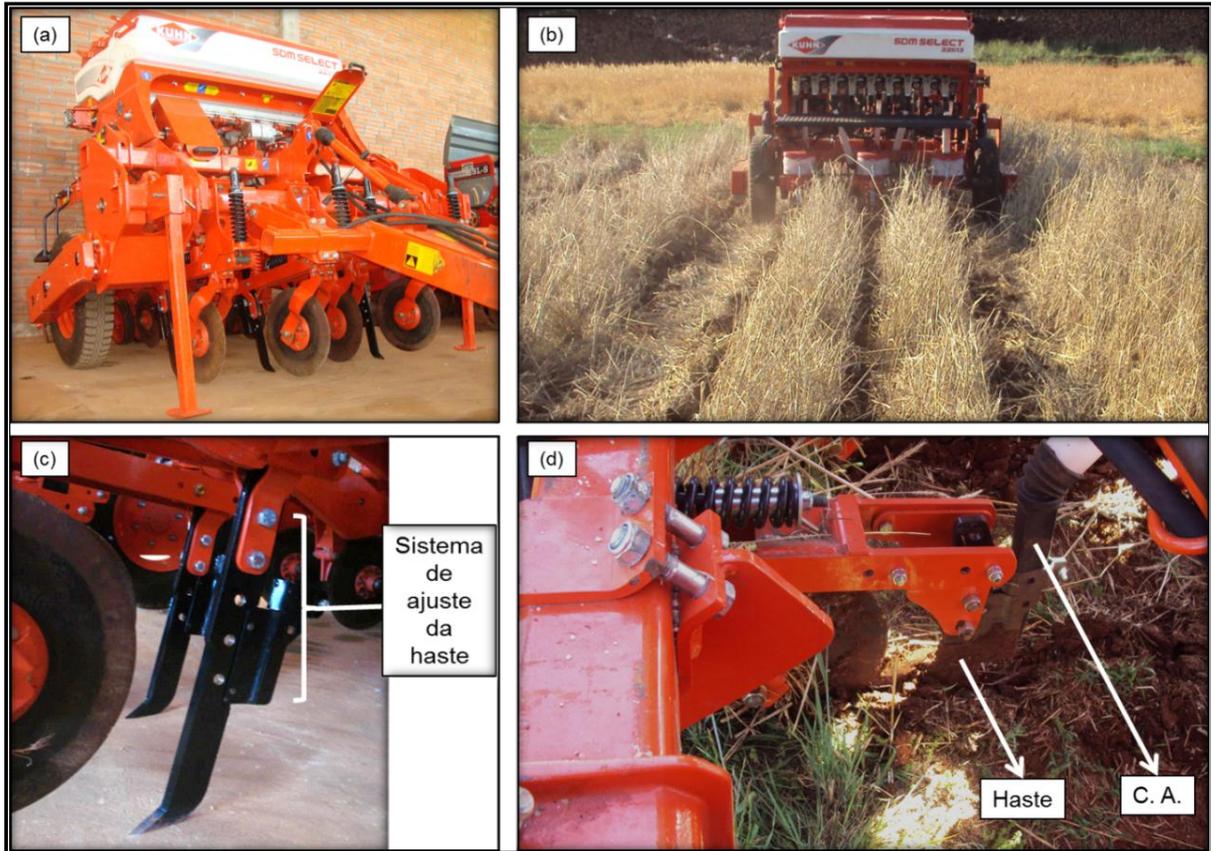


Figura 1. Semeadora para plantio direto, estacionada (a) e semeando milho sobre resíduos do cultivo de centeio na área experimental (b); sistema de ajuste de profundidade da haste sulcadora (c) e, em operação, abrindo o sulco de semeadura e posicionando o fertilizante no solo, através do cano condutor de adubo (C.A.) acoplado a haste (d).

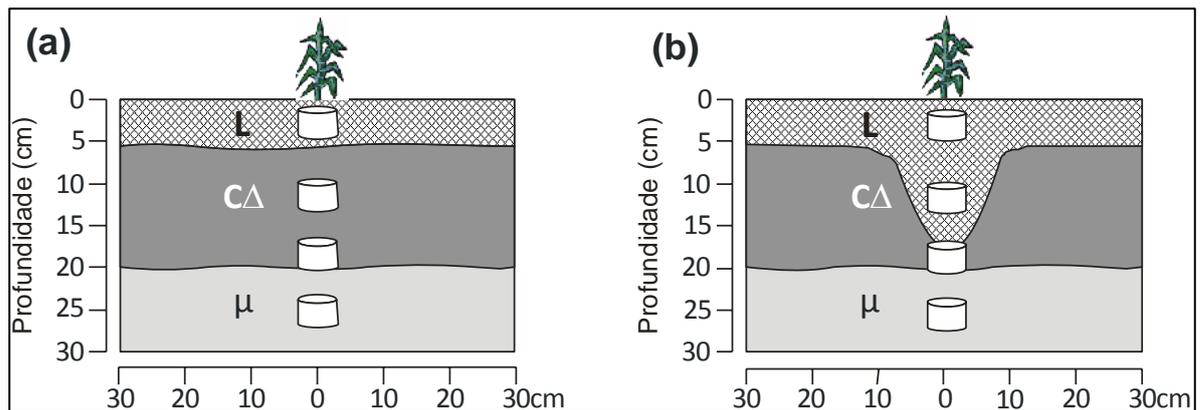


Figura 2. Perfil cultural do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, após a colheita de milho semeado com semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para operar a 0,05, 0,07 (a) e 0,17 m de profundidade (b); e a posição da amostragem do solo. Obs.: L = camada de solo solto com macro e microagregados, porosidade visível a olho nu e abundante presença de raízes; C Δ = camada de solo com estrutura maciça e homogênea, sem porosidade visível a olho nu e menor presença de raízes em relação à camada L; μ = camada de solo com estrutura típica de Nitossolo não compactado.

Como à profundidade de ação da haste sulcadora, no tratamento T₃, foi de 0,17 m, a camada (0,07-0,20 m) foi dividida em duas: 0,07-0,17 e 0,17-0,20 m. No centro de cada camada, na linha de semeadura, foram coletadas três amostras de solo com estrutura preservada (Figura 2), no lado preservado da trincheira, utilizando cilindros de aço inox de 54,3 cm³ (3,0 x 4,8 cm).

Nas amostras coletadas foram determinados os atributos físicos do solo: densidade de solo; porosidade (macro e total); resistência à penetração; grau de compactação e água disponível. Após coletadas, as amostras foram envoltas em filme plástico, transportadas para o laboratório, em caixas, sendo os cilindros posicionados horizontalmente para não ocorrer compactação do solo em seu interior, saturadas por capilaridade por 48 horas, equilibradas nas tensões de 1 e 6 kPa, em mesa de tensão, e a 10, 33, 100, 300 e 1.500 kPa em câmaras de pressão de Richards, obtendo-se a umidade para cada tensão. Os dados de umidade foram ajustados à equação de van Genuchten (1980) através do Soil Water Retention Curve software version 3.0 beta, obtendo-se a curva de retenção de água ajustada. Pela diferença entre a umidade na capacidade de campo (considerando a tensão de 10 kPa) e a no ponto de murcha permanente (considerando a tensão de 1.500 kPa), calculou-se a água disponível.

A densidade e a porosidade do solo foram determinadas conforme Donagema et al. (2011). A resistência à penetração foi determinada com penetrômetro eletrônico de bancada, modelo MA 933, marca Marconi, dotado de variador eletrônico de velocidade, sistema de registro de dados, cone com semi-ângulo de 30^o, diâmetro da haste de 3 mm e velocidade de penetração de 1 cm min⁻¹ (Lima et al., 2012). As penetrações foram realizadas com as amostras equilibradas na tensão de 10 kPa. Foram realizadas três penetrações por amostra. As leituras da parte superior (0,3 cm) e inferior (0,3 cm) de cada amostra foram descartadas, considerando-se somente as leituras dos 2,4 cm centrais de cada amostra.

A seguir as amostras foram submetidas ao teste de compressão uniaxial. Em cada amostra, subsequentemente aplicou-se as pressões de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1.600 kPa (Silva et al., 2007), e o deslocamento para cada pressão aplicada foi gravado. Em seguida as amostras foram secas a 105^o por 24 horas e a densidade calculada. Para o cálculo do grau de compactação do solo, foram utilizadas como densidade referência as densidades do solo obtidas após a aplicação das pressões de 200, 400 e 800 kPa, em laboratório. Através da relação entre a densidade inicial do solo (no momento da coleta) e os valores de densidade referência obteve-se o grau de compactação do solo, conforme Equação 1 (Reichert et al., 2009).

$$Gc (\%) = \frac{Ds \text{ inicial}}{Ds \text{ Referência}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Gc = grau de compactação do solo;

Ds inicial = densidade do solo no momento da coleta;

Ds Referência = densidade do solo após aplicação de 200, 400 ou 800 kPa de pressão.

Avaliação do sistema radicular e do diâmetro de colmo das plantas de milho

Quando as plantas do milho semeado em setembro de 2011 encontravam-se no estágio fenológico R3 (Ritchie & Hanway, 1993), coletou-se, com placa de pregos de 0,6 x 0,3 x 0,05 m (Figura 3), um monólito de solo correspondente a nove dm³, por parcela, conforme Bohm (1979). Antes da coleta mediu-se o diâmetro do segundo entrenó acima do solo, em 10 plantas de milho na linha central das parcelas. O diâmetro médio do segundo entrenó das plantas, obtido para cada parcela, serviu de referência para a escolha da planta, da qual foi avaliado o sistema radicular.

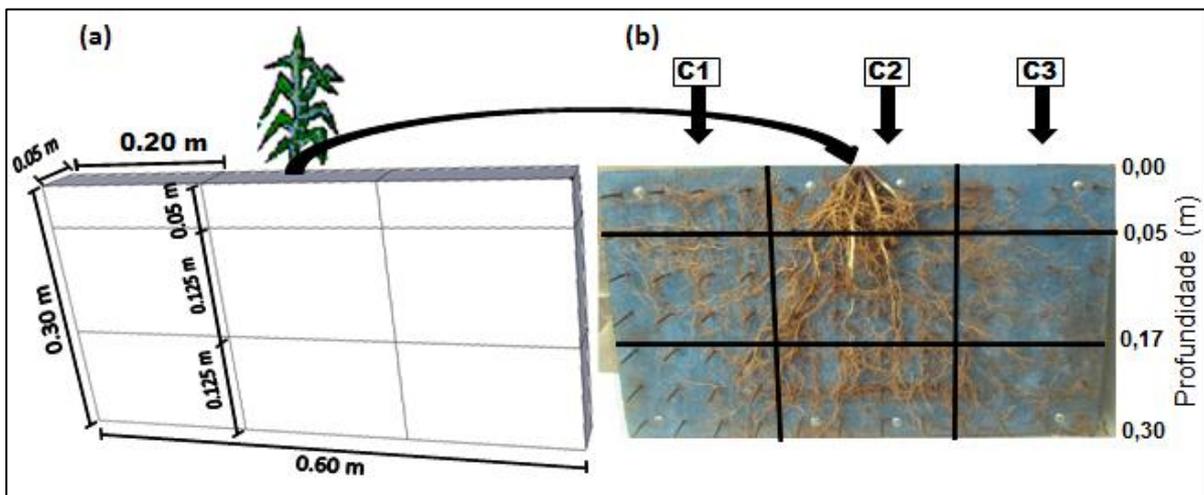


Figura 3. a) Dimensões do monólito de solo coletado; posição da coleta do monólito em relação à planta de milho; local da divisão do monólito. b) local onde as raízes foram cortadas após serem limpas, mostrando as três camadas e as três colunas (C1, C2 e C3).

Para coletar os monólitos procedeu-se da seguinte forma: (1) abriu-se uma trincheira no sentido transversal à linha de semeadura, sendo a planta deixada no centro (Figura 3a); (2) cortou-se a planta rente ao solo; (3) alinhou-se a trincheira, com auxílio de uma pá de corte, até a metade do diâmetro do colmo do milho, onde foi posicionada a placa de pregos; (4) com

auxílio de um macaco hidráulico os pregos da placa foram completamente introduzidos no perfil do solo; (5) cavou-se ao redor do monólito até que este ficasse solto; (6) após a retirada, emparelhou-se o solo nas dimensões horizontais e verticais da placa e na altura dos pregos; (7) imergiu-se os monólitos em solução de NaOH 0,2 M, onde permaneceram por 24 horas (para dispersar o solo e facilitar a lavagem das raízes); (8) e lavou-se o solo com jatos fracos de água, expondo o sistema radicular do milho.

Durante a lavagem colocou-se sobre o monólito uma tela para evitar o deslocamento das raízes. Após as raízes serem limpas, cada monólito foi dividido em três camadas (0-0,05; 0,05-0,17; 0,17-0,30 m) que corresponde, aproximadamente, as camadas estratificadas no perfil cultural do solo, e três colunas de 0,20 m, para facilitar a avaliação (Figura 3). As raízes contidas em cada parte do monólito foram cortadas, postas em sacos plásticos, armazenadas em um resfriador (na temperatura de 2° C) e, sequencialmente, contabilizadas em separado.

As raízes contidas em cada saco plástico foram homogeneizadas. Posteriormente, retirou-se deste saco plástico uma subamostra correspondente a 30%, que foi utilizada para medir o comprimento radicular (CR). As raízes contidas nesta subamostra foram postas em um recipiente com uma lâmina de água, organizadas de forma a não se sobreporem e submetidas à digitalização com escâner HP Scanjet 3570C. O CR foi quantificado pelo programa Safira, conforme Jorge & Rodrigues (2008). A subamostra (30%), assim como o restante da amostra (70% da massa total) foram secas separadamente, em estufa a 65 °C por 72 horas, para permitir a extrapolação dos resultados para toda a amostra. Após a secagem, obteve-se a massa de matéria seca de raízes em balança de precisão 0,0001 g. Pela relação dos valores de massa de matéria seca de raízes e CR com o volume de solo que as raízes ocupavam, obteve-se a densidade radicular em quilograma de raiz por metro cúbico de solo e CR em metro de raiz por metro cúbico de solo. A sequência de etapas realizadas para se obter os dados referentes às variáveis de raízes são mostradas na Figura 4.

Foram coletadas, também no monólito de solo, amostras deformadas nas camadas 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,30 m. Estas foram utilizadas para determinar: pH em água, Fósforo (Mehlich-1), potássio, cálcio, magnésio, alumínio, e acidez potencial (H+Al), conforme Donagema et al. (2011). Os valores médios destas variáveis encontram-se na Tabela 2.

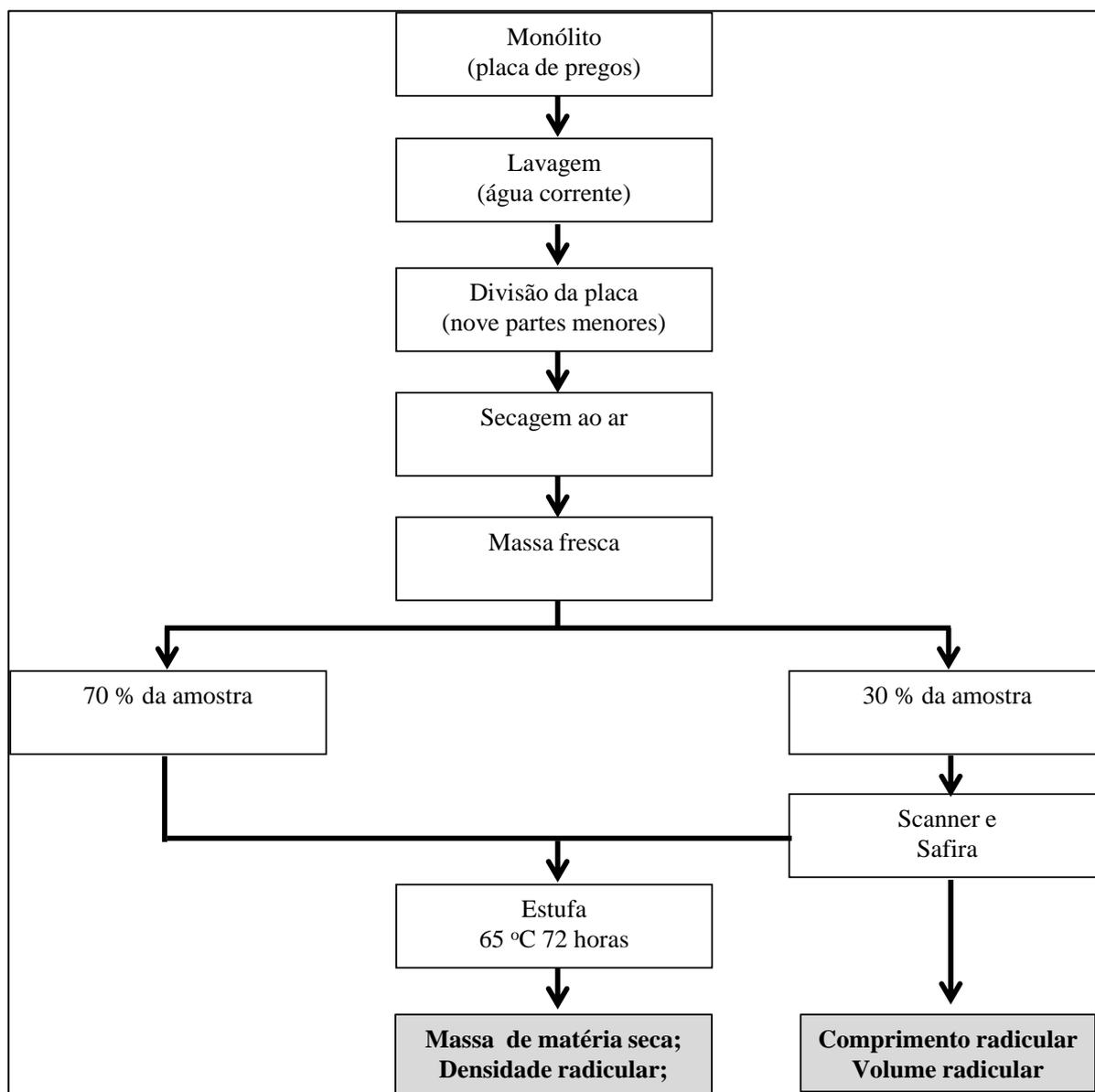


Figura 4. Sequência de atividades durante o processo de avaliação do sistema radicular do milho, deste o momento da retirada do monólito de solo até a obtenção dos resultados finais.

Tabela 2. Valores médios de pH em água, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio, Alumínio e H + Al do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, na área experimental.

Camada (m)	pH Água	Fósforo ----- mg kg ⁻¹ -----	Potássio	Cálcio	Magnésio ----- mmol _c kg ⁻¹ -----	Alumínio	H + Al
0,00-0,05	4,97	45,6	217,9	34,5	15,4	13,8	94,7
0,05-0,10	5,29	23,1	175,3	38,4	17,1	9,6	77,2
0,10-0,15	5,48	12,9	144,8	42,1	19,7	6,3	66,7
0,15-0,20	5,54	7,7	101,5	41,7	20,9	3,8	63,8
0,20-0,30	5,50	3,2	64,2	32,1	18,2	8,4	64,3

Análise estatística

Em relação às variáveis macroporosidade, porosidade total, densidade e resistência à penetração, após a realização da ANOVA, foi obtida a diferença mínima significativa entre os tratamentos, em cada camada, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Em relação ao grau de compactação do solo e ao diâmetro de colmo do milho, se calculou os desvios em relação à média para cada tratamento. Em relação à água disponível, massa de matéria seca de raiz, densidade e comprimento radicular, após a realização da ANOVA, procedeu-se teste de médias pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

5.4. Resultados e discussão

Parâmetros físicos do solo

Os atributos do solo, macroporosidade (Ma), porosidade total (Pt), densidade (Ds) e resistência à penetração (Rp) (Figuras 5a, 5b, 5c e 5d, respectivamente) obtidos nos tratamentos onde a semeadura do milho foi realizada com semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo haste sulcadora, atuando a 0,05 m (T₁) e a 0,07 m de profundidade (T₂), evidenciam que o solo na área experimental, manejada sob plantio direto, encontra-se fisicamente degradado.

Na camada 0,07-0,20 m, o solo apresentou elevados valores de Ds (1,4 g cm⁻³) e de Rp (3,0 MPa) e reduzidos valores de Ma (inferior a 0,08 m³ m⁻³). Por outro lado, na camada superficial, 0,0-0,07 m, os valores médios de Ma aproximaram-se de 0,20 m³ m⁻³, e os valores de Ds e Rp foram ligeiramente inferiores àqueles obtidos na camada 0,07-0,20 m. Estes resultados retratam as condições físicas do solo sob plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil. Nota-se que apenas nos primeiros centímetros do perfil do solo as condições físicas são favoráveis ao desenvolvimento das plantas, corroborando a idéia de Drescher et al. (2011). Estes autores relatam a presença de uma camada compactada e/ou adensada localizada aproximadamente entre 0,05 e 0,20 m de profundidade, em áreas manejadas sob plantio direto.

Parte desta degradação deve-se à permanência da camada subsuperficial degradada no preparo convencional do solo quando da adoção do plantio direto (Tavares Filho et al., 2001). O tráfego de máquinas em áreas sob plantio direto agrava o problema por compactar o solo em seu estrato superficial (Veiga et al., 2007; Collares et al., 2008; Freddi et al., 2009). Segundo Bergamin et al. (2010), o tráfego de um trator agrícola com 5 Mg de massa, afetou a estrutura de um Latossolo Vermelho até 0,1 m de profundidade, diminuindo a Ma e elevando a Ds e

Rp. Isto explica parte da degradação física do solo observada mesmo em áreas sob plantio direto. Nos primeiros centímetros (0,0-0,07 m) do perfil destes solos, a compactação não é observada devido, também, ao acúmulo de material orgânico (Machado & Silva, 2001), que influencia a estrutura do solo (Costa et al., 2008; Martins et al., 2009), os ciclos de umedecimento e secagem do solo, que influenciam na agregação (Dexter, 1991; Horn & Peth, 2009; Bavaresco et al., 2012) e à ação dos elementos rompedores de solo das semeadoras utilizadas para implantação das culturas nestas áreas (Secco et al., 2009).

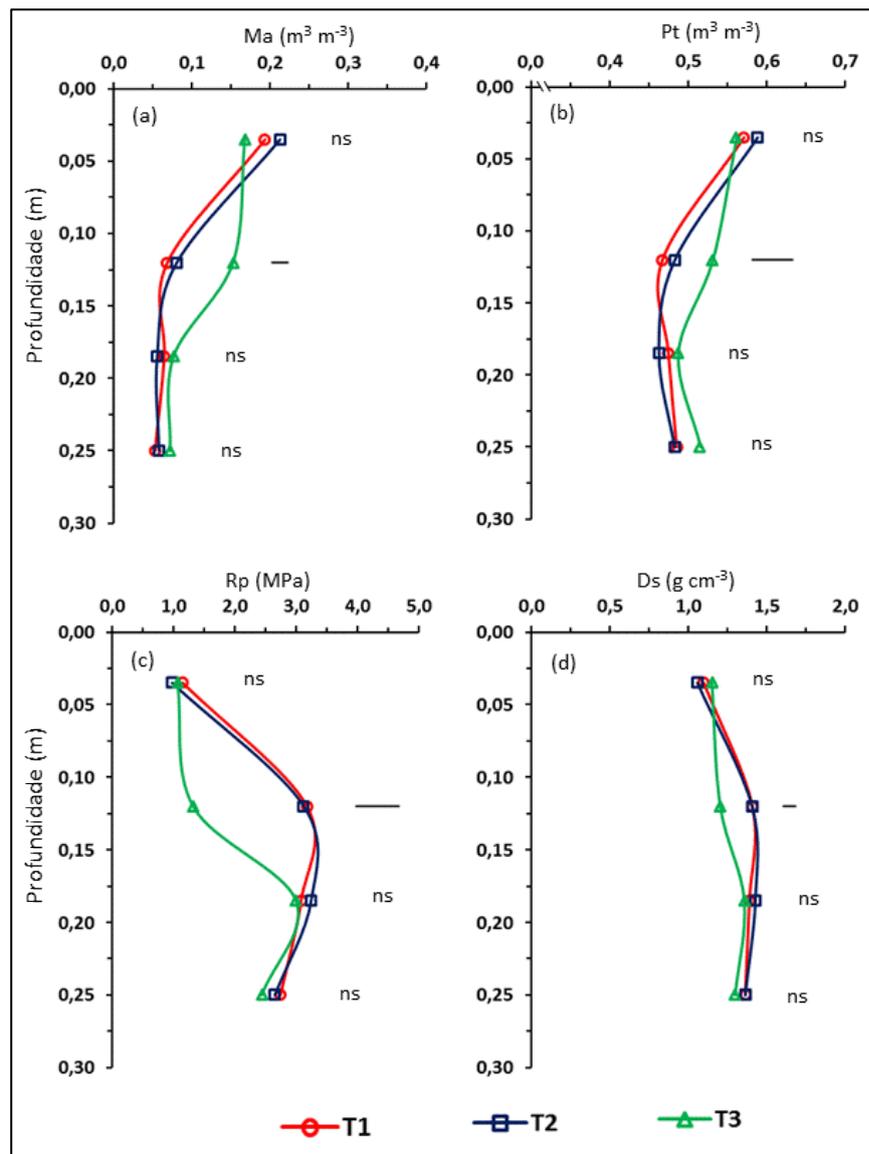


Figura 5. Macroporosidade (a); porosidade total (b); densidade (c) e resistência à penetração (d) do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico após semeadura de milho com semeadora equipada com haste sulcadora atuando a 0,05 m (T₁), 0,07 m (T₂) e 0,17 m de profundidade (T₃). Obs.: Linhas horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro e ns que não há diferença pelo mesmo teste.

As semeadoras utilizadas para plantio direto, na Região Subtropical Úmida do Brasil, são equipadas com elementos rompedores de solo que, durante a implantação das culturas, escarificam o solo na linha de semeadura até aproximadamente 0,07 m de profundidade (Casão Jr. et al., 2012), contribuindo para que as condições físicas do solo, até esta profundidade, tornem-se favoráveis ao desenvolvimento das plantas (Secco et al., 2009; Drescher et al., 2011). Abreu et al. (2004) observaram que a mobilização superficial do solo proporcionada pelos discos da semeadora, utilizada para semear soja, reduziu a Ds de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob plantio direto. Conforme Genro Jr. et al. (2004), durante a implantação de culturas de inverno, em fileiras espaçadas 0,17 m, ocorre mobilização de aproximadamente 30% do solo na camada 0,0-0,05 m, o que, somado ao revolvimento realizado durante a implantação das culturas de verão, resulta em grande volume de solo mobilizado em seu estrato superficial.

A utilização da semeadora equipada com haste sulcadora atuando a até 0,17 m de profundidade (T_3), durante a semeadura do milho, promoveu melhoria nos atributos físicos do solo na camada 0,07-0,17 m (Figura 5). Ao agir na camada até então compactada, as hastes sulcadoras promoveram alterações significativas nos atributos Ma, Pt, Ds e Rp, em comparação ao solo da área onde o milho foi semeado com semeadora equipada com haste sulcadora atuando a 0,05 e 0,07 m de profundidade, respectivamente T_1 e T_2 . Nesta camada a Ma passou de 0,07 (T_1) para $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (T_3) e a Pt passou de 0,47 (T_1) para $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (T_3). A Ds e Rp diminuíram, passando de 1,41 (T_1) para $1,20 \text{ g cm}^{-3}$ (T_3) e de 3,17 (T_1) para 1,31 MPa, respectivamente. Nas camadas localizadas abaixo do 0,17 m não houve influência da profundidade da ação das hastes sulcadoras nos atributos físicos do solo.

O emprego de semeadora equipada com elementos rompedores de solo tipo haste sulcadora atuando em maior profundidade (0,17 m), durante a semeadura de culturas de verão, portanto, promove a melhoria física da camada subsuperficial do solo sob plantio direto, diferentemente dos elementos rompedores tipicamente empregados nas semeadoras para plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil.

A melhoria das condições físicas do solo, proporcionada pela utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m), corrobora dados da literatura. Cepik et al. (2010), estudando o efeito da profundidade de ação das hastes sulcadoras de uma semeadora sobre a mobilização de solo no sulco de semeadura em área sob plantio direto, observaram que, com a semeadura de milho com semeadora de três linhas, o aumento de 0,05 m na profundidade de ação do sulcador (0,065 para 0,115 m) implicou em 20,6% de aumento na

área de solo mobilizada, sendo notória a diferença entre as profundidades de ação do sulcador quanto ao volume de solo mobilizado. Com espaçamento de 0,80 m entre linhas, utilizando três linhas, quando a profundidade passou de 0,065 para 0,115 m, o aumento na mobilização de solo foi da ordem de $13,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, e utilizando cinco linhas o incremento de solo mobilizado foi de $36,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Na Figura 6 são apresentados os valores do grau de compactação do solo obtidos na camada 0,07-0,17 m. A utilização da semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para operar a 0,17 m de profundidade (T_3) proporcionou a diminuição do grau de compactação em relação à utilização da semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para atuar a 0,05 m (T_1) e 0,07 m (T_2) de profundidade. Isto reflete a melhor condição estrutural do solo da camada 0,07-0,17 m após o uso da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (Figura 3).

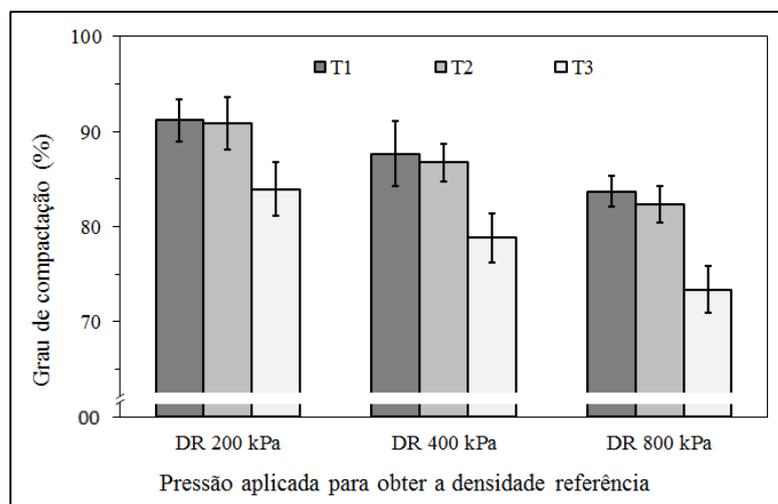


Figura 6. Grau de compactação de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico em plantio direto, na camada 0,07-0,17 m, em função da densidade referencial obtida com a aplicação das pressões de 200 kPa (DR 200 kPa), 400 kPa (DR 400 kPa) e 800 kPa (DR 800 kPa), seis meses após a semeadura de milho com uma semeadora equipada hastes sulcadora ajustada para operar a 0,05 m (T_1), 0,07 m (T_2) e 0,17 m de profundidade (T_3).

A relação do grau de compactação com as propriedades físicas do solo é mostrada na literatura (Suzuki et al., 2013; Reichert et al., 2009). Segundo Suzuki et al. (2013), em um Latossolo, com o aumento do grau de compactação ocorre redução linear da M_a e aumento linear da R_p do solo. Hakansson & Lipiec (2000) também enfatizam que o grau de compactação é um bom indicador de mudanças nas propriedades físicas do solo, sendo, inclusive, mais útil do que os atributos densidade e porosidade em estudos de compactação do solo. Portanto, os resultados referentes ao grau de compactação, obtidos neste estudo (Figura 6), reforçam a tese de que o

emprego de semeadora equipada com elementos rompedores de solo tipo haste sulcadora ajustada para operar na profundidade da camada compactada, para a semeadura direta das culturas de verão, proporciona melhor condição física para o desenvolvimento das plantas.

A mudança na estrutura do solo em função da ação profunda da haste sulcadora da semeadora (T_3), observada através dos atributos físicos do solo dependentes da estrutura do solo (Figuras 5 e 6), se refletiu na retenção de água no solo (Figura 7). A elevada porosidade e a melhor distribuição de tamanho de poros, nos primeiros centímetros do perfil do solo, proporcionam, na camada 0-0,07 m, maior volume de água retida à baixas tensões, sendo que, com o aumento da tensão aplicada, a umidade volumétrica diminui tornando-se muito baixa a partir da tensão de 100 kPa. Por consequência, a água disponível nesta camada é maior em relação às demais (Tabela 3). Beutler et al. (2002) observaram influência dos atributos relacionados à estrutura do solo na retenção de água no solo, nas diferentes tensões em um Latossolo Vermelho Eutroférico e um Latossolo Vermelho Distrófico. Em solos de textura mais fina, a distribuição de poros por tamanho é mais uniforme, o que proporciona um decréscimo gradual da umidade com o aumento da tensão aplicada.

Na camada 0,07-0,17 m, em comparação com a camada 0,0-0,07 m, o volume de água retida nas tensões mais baixas, é menor. Por outro lado, o conteúdo de água retida nas maiores tensões é mais elevado, resultando em menor disponibilidade de água as plantas (Tabela 3). Nesta camada, em T_1 e T_2 , a compactação (Figura 5 e 6) modificou a estrutura do solo, sobretudo no que se refere à porosidade do solo, o que proporcionou a retenção da água no solo com maior energia e em maior volume. Porém, a maior retenção de água em solos compactados não resulta em maior disponibilidade de água às plantas, visto que esta é retida a tensões maiores (próximas a 1.500 kPa) tornando-a menos disponível (Silva et al., 2006). A utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (T_3) proporcionou, na camada 0,07-0,17 m, maior volume de água retida nas menores tensões e diminuição da retenção nas maiores tensões, aumentando à disponibilidade de água às plantas em comparação a T_1 e T_2 (Tabela 3).

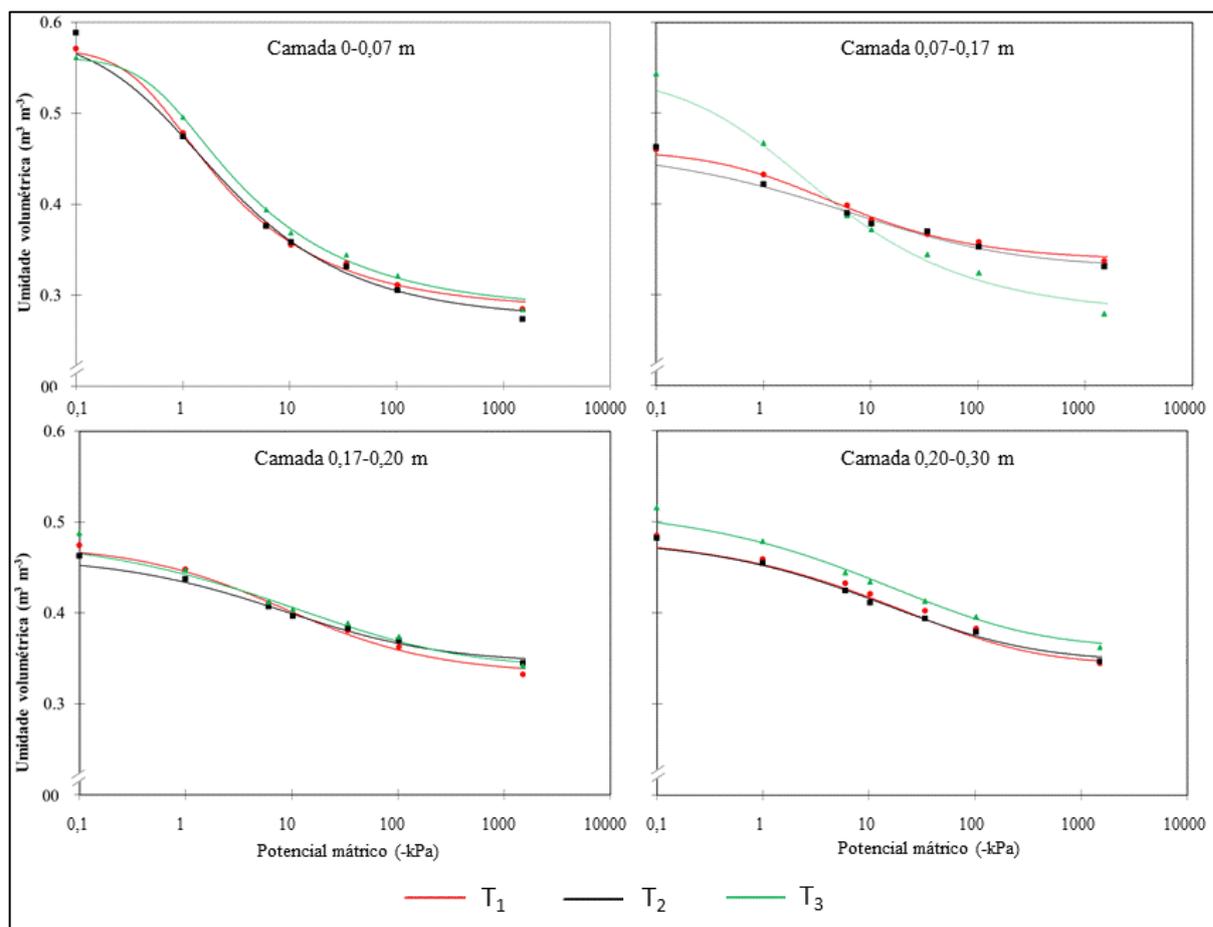


Figura 7. Curva de retenção de água em diferentes camadas em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico, seis meses após a realização da semeadura de milho com uma semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo haste sulcadora ajustada para operar a 0,05 m (T₁), 0,07 m (T₂) e 0,17 m de profundidade (T₃).

Tabela 3. Água disponível em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto, em diferentes camadas, após semeadura de milho com uma semeadora equipada hastes sulcadoras ajustadas para operar a 0,05 m (T₁), 0,07 m (T₂) e 0,17 m de profundidade (T₃).

Camada	T ₁	T ₂	T ₃	CV
m	m ³ m ⁻³			%
0,00-0,07	0,065 A ¹	0,076 A	0,077 A	16,7
0,07-0,17	0,044 B	0,048 B	0,081 A	18,5
0,17-0,20	0,062 A	0,049 A	0,060 A	18,3
0,20-0,30	0,070 A	0,064 A	0,071 A	27,4

¹ Letras iguais na mesma linha significa que não há diferença estatística significativa pelo teste Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Parâmetros de planta

A melhoria física do solo, proporcionada pela utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m), influenciou o desenvolvimento das plantas de milho. O diâmetro do colmo do milho semeado com a semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (T₃) aumentou significativamente, em comparação às plantas do milho semeado com semeadora equipada com hastes sulcadora atuando a 0,05 m de profundidade (T₁) (Figura 8). O engrossamento do colmo das plantas pode ser atribuído a melhor condição física do solo da camada 0,07-0,17 m (Figuras 5 e 6, Tabela 3) proporcionada pela ação das hastes sulcadoras de ação profunda (T₃). Estes dados estão em consonância com Freddi et al. (2007 e 2009), que observaram que a diminuição da R_p, na profundidade de 0,0 a 0,2 m em um Latossolo Vermelho de textura média e em um Latossolo Vermelho de textura argilosa, proporciona aumento linear da altura, do diâmetro do colmo e da massa de matéria seca das plantas de milho cultivadas nestes solo.

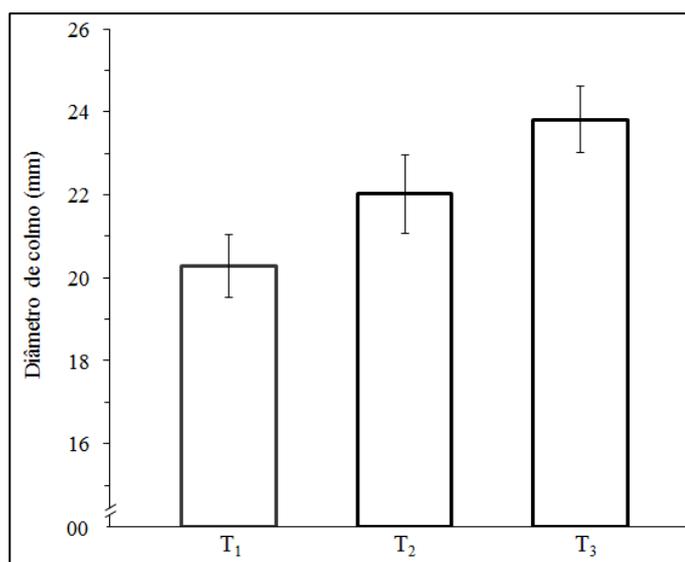


Figura 8. Diâmetro do colmo do milho semeado com semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo hastes sulcadora ajustada para atuar a 0,05 m (T₁), 0,07 m (T₂) e 0,17 m de profundidade (T₃), em um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico. Barras verticais representam os desvios em relação à média.

O desenvolvimento radicular do milho também foi modificado quando da utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m). Observa-se, na Tabela 4, que no solo onde a semeadura do milho foi realizada com a semeadora equipada com hastes sulcadora ajustada para operar em profundidade (T₃), que a massa de matéria seca total de raiz

foi superior à massa de matéria seca total de raiz das plantas semeadas com semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para operar a 0,05 m (T₁) e a 0,07 m de profundidade (T₂), tradicionalmente adotadas na Região Subtropical Úmida do Brasil.

Tabela 4. Massa de matéria seca de raiz de milho em diferentes camadas de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico.

Camada m	Massa de matéria seca de raiz				Massa de matéria seca de raiz		
	T ₁ ¹	T ₂	T ₃	CV	T ₁	T ₂	T ₃
	----- g planta ⁻¹ -----			%	----- % camada ⁻¹ -----		
0,00-0,05	6,29 A ²	5,61 A	6,45 A	17,4	73,9	63,8	59,4
0,05-0,17	1,49 C	2,39 B	3,79 A	13,4	17,5	27,2	34,9
0,17-0,30	0,73 A	0,79 A	0,63 A	8,9	8,6	9,0	5,8
Total	8,52 B	8,80 B	10,87 A	9,5	100,0	100,0	100,0

¹ milho semeado com semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo haste sulcadora ajustada para operar a 0,05 m (T₁); 0,07 m (T₂) e 0,17 m de profundidade (T₃), em área sob plantio direto. ² Letras iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

O acréscimo na massa de matéria seca de raízes por planta de milho deve-se ao significativo aumento da massa de matéria seca de raízes que ocorreu na camada 0,05-0,17 m. Nesta profundidade se obteve diferença significativa do T₃ em relação ao T₁ e T₂. A degradação física do solo na camada subsuperficial, portanto, favorece a concentração de raízes na camada 0,0-0,05 m do solo, onde se concentrou 73,9% e 63,8% da massa de matéria seca das raízes, quando da utilização de semeadora equipada com hastes sulcadora operando a 0,05 m (T₁) e a 0,07 m (T₂), respectivamente. Na camada 0,05-0,17 m, estes percentuais não ultrapassaram 17,5% (T₁) e 27,2% (T₂).

Estes resultados corroboram o argumento de Denardin et al. (2008), de que a utilização de semeadora-adubadora equipada apenas com elementos rompedores de solo que atuam até no máximo 0,1 m, do perfil do solo, favorece a concentração do sistema radicular na camada superficial do solo e contribui para a degradação da estrutura do solo sob plantio direto, em subsuperfície. Com o aprofundamento da haste sulcadora (T₃), que passou a atuar na camada de solo degradada, ocorreu a diminuição do impedimento físico (Figura 5), imposto pelo solo ao desenvolvimento das raízes, nesta camada. Assim, o desenvolvimento das raízes do milho, e por consequência a atividade radicular, passou a ser mais intensa na camada 0,05-0,17 m. Boone & Veen (1982) mencionam que o crescimento das raízes de milho é afetado com R_p entre 0,9 e 1,6 MPa e Imhoff et al. (2010) observaram que com valores de R_p igual a 0,9 MPa já havia restrição ao crescimento das raízes do milho, identificando ainda R_p de 3 MPa como o limite para o crescimento radicular.

A densidade radicular também foi maior quando da utilização da haste sulcadora de ação profunda (T_3), em relação à utilização da semeadora equipada com hastes sulcadora operando a 0,05 m (T_1) e 0,07 m de profundidade (T_2), sobretudo na camada 0,05 a 0,17 m (Tabela 5). A densidade radicular total por planta, com a maior profundidade de ação do rompedor de solo da semeadora, aumentou, sendo que os valores passaram de 0,95 e 0,98 kg m⁻³ em T_1 e T_2 , respectivamente, para 1,21 kg m⁻³ em T_3 . Percebe-se que o aumento na densidade radicular ocorreu na profundidade de 0,05 a 0,17 m e na linha de semeadura da cultura do milho, onde a haste sulcadora de ação profunda (T_3) agiu (Tabela 6).

Tabela 5. Densidade e comprimento radicular de milho em diferentes camadas de solo.

Camada m	Tratamento ¹			CV %
	T_1	T_2	T_3	
Densidade radicular (kg m ⁻³)				
0,00-0,05	4,20 A ²	3,58 A	4,30 A	19,8
0,05-0,17	0,40 B	0,70 AB	1,01 A	25,1
0,17-0,30	0,20 AB	0,21 A	0,17 B	8,9
Total	0,95 B	0,98 BA	1,21 A	9,9
Comprimento radicular (m m ⁻³)				
0,00-0,05	56.882 A	37.651 A	56.443 A	23,2
0,05-0,17	12.810 A	21.679 A	23.570 A	26,8
0,17-0,30	14.132 A	15.374 A	12.896 A	10,2
Total	20.706 A	21.714 A	24.602 A	9,4

¹ T_1 = milho semeado com semeadora equipada com elemento rompedor de solo tipo hastes sulcadora ajustada para operar a 0,05 m de profundidade; T_2 = semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para operar a 0,07 m; T_3 = semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para operar a 0,17 m de profundidade. ² Letras iguais na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 6. Densidade radicular de milho em função da profundidade do perfil e da distância horizontal do sistema radicular da planta de milho.

Camada m	T_1 ⁽¹⁾			T_2			T_3		
	C1 ⁽²⁾	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
kg m ⁻³									
0,00-0,05	0,920	10,539	1,126	0,445	9,800	0,480	0,300	12,240	0,366
0,05-0,17	0,193	0,880	0,120	0,225	1,635	0,252	0,346	2,464	0,225
0,17-0,30	0,181	0,296	0,111	0,208	0,267	0,160	0,187	0,166	0,148

⁽¹⁾ Milho semeado com semeadora equipada com haste sulcadora ajustada para operar a 0,05 m (T_1), 0,07 m (T_2) e 0,17 m de profundidade (T_3). ⁽²⁾ Colunas correspondentes a 0,20 m de espessura, separadas no monólito de solo coletado para a avaliação do sistema radicular das plantas de milho, conforme ilustrado na Figura 3.

O comprimento radicular total passou de 20.706 m de raízes por m⁻³ de solo e de 21.714 m m⁻³, respectivamente em T_1 e T_2 , para 24.602 m m⁻³ quando da utilização da

semeadora equipada com hastes sulcadora de ação profunda (T_3) (Tabela 5). O que também ocorreu na camada 0,05 a 0,17 m, onde os valores passaram de 12.810 m m^{-3} em T_1 para 23.570 m m^{-3} quando da utilização da semeadora equipada com hastes sulcadora de ação profunda (T_3) (Tabela 5). Em relação aos valores referentes ao comprimento não foram encontradas diferenças estatísticas significativas a 5% de probabilidade de erro. Provavelmente isto ocorreu devido ao elevado coeficiente de variação (CV%) observado para esta varável. Elevados valores de CV%, quando da realização de estudos que envolva sistema radicular de plantas, são frequentemente observados (De Maria et al., 1999; Foloni et al., 2003).

Não apenas a melhor condição física do solo, proporcionada pela haste sulcadora de ação profunda da semeadora, possibilitou o aprofundamento do sistema radicular das plantas de milho, mas também, o aprofundamento do sistema radicular das plantas pode ter contribuído para que o solo se mantivesse em melhores condições físicas na camada 0,07-0,17 m. Essa constitui a principal diferença entre a escarificação tradicional do solo e o uso da semeadora com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m) que é o desenvolvimento imediato de uma planta sob o solo fisicamente melhor. Conforme Horn & Peth (2009), o processo de agregação passa primeiramente pela força mecânica e posteriormente há um aprimoramento da agregação pela atividade biológica.

Partindo do princípio que a melhoria física do solo possibilitou o aprofundamento do sistema radicular das plantas e que as raízes contribuem para a reestruturação e manutenção da estrutura do solo, o uso da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda, para a implantação das culturas de verão, especialmente de gramíneas (Garcia & Rosolem, 2010; Martins et al., 2009; Wendling et al., 2005), tem potencial para mitigar a compactação do solo presente em subsuperfície em áreas manejadas sob plantio direto. A eficiência de sua ação, no entanto, depende de que o sistema plantio direto adotado e praticado considere a totalidade de seus preceitos, principalmente no que tange à diversificação de espécies.

Se as espécies implantadas forem plantas com sistema radicular agressivo, como o milho empregado neste estudado, no decorrer dos anos agrícolas, a concentração de carbono orgânico no solo poderá aumentar, devido à incorporação de material orgânico, via sistema radicular, que irá se desenvolver mais intensamente na camada 0,05-0,17 m, quando da utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m). Conforme Allmaras et al. (2004), a contribuição do sistema radicular de plantas como o milho, para o aumento da matéria orgânica do solo, é maior que o da parte aérea. Segundo Neumann & Romheld (2001), as raízes das plantas contribuem com a exsudação de compostos orgânicos

para o solo, e anualmente, as plantas translocam para as raízes cerca de 30-60% do carbono fixado via fotossíntese. Destes, cerca de 70% podem ser liberados na rizosfera.

Segundo Denardin et al. (2011), o aporte ao solo de material orgânico em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo é um importante preceito do sistema plantio direto, fundamental para a sustentabilidade do sistema agrícola produtivo. A diversificação de culturas, envolvendo plantas que tenham sistema radicular agressivo, pode promover a remediação efetiva da compactação do solo (Colonego & Rosolem, 2010). Chen & Weil (2011), em um Typic/Aquic Hapludults e um Psammentic Hapludults, observaram que a utilização de *Raphanus sativus* beneficiou a penetração do sistema radicular do milho em solo compactado e a utilização de centeio melhorou o solo em regiões de clima temperado, especialmente em relação à disponibilidade de água às plantas.

Convém ressaltar que o aprofundamento do sistema radicular das culturas de verão, neste estudo representado pela cultura do milho, quando da utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m), pode diminuir as frustrações de safra agrícola que ocorrem na Região Subtropical Úmida do Brasil quando da ocorrência de estiagens (Denardin et al., 2011). Com o aprofundamento do sistema radicular o volume de solo explorado pelas raízes deverá ser maior e, conseqüentemente, a absorção da solução do solo contendo água e nutrientes, fundamentais para o desenvolvimento e produtividade das plantas, se elevará.

5.5. Conclusões

A utilização da semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m) promoveu o aumento da porosidade total, da macroporosidade e da disponibilidade de água às plantas e possibilitou a diminuição da resistência do solo à penetração mecânica, da densidade do solo e do grau de compactação do solo, na camada 0,07-0,17 m até então degradada.

A utilização da semeadora com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m) possibilitou o melhor desenvolvimento das plantas de milho no solo sob plantio direto, evidenciado pelo aumento do diâmetro do colmo, da densidade e comprimento radicular e pelo aprofundamento das raízes das plantas de milho na camada 0,05-0,17 m.

Semeadoras equipadas com hastes sulcadoras de ação profunda, portanto, apresentam potencial para mitigar a degradação estrutural do solo em áreas manejadas sob plantio direto na Região Subtropical Úmida do Brasil.

5.6. Referências bibliográficas

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo Franco-Arenoso sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:519-531, 2004.
- ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; CLAPP, C.E. Corn-residue transformations into root and soil carbon as related to nitrogen, tillage and stover management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:1366-1375, 2004.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management-a review. *Soil Use Management*, 25:335-345, 2011.
- BAVOSO, M.A.; SILVA, A.P.; FIGUEIREDO, G.C.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B. Resiliência física de dois Latossolos Vermelhos sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:1892-1904, 2012.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:681-691, 2010.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:581-588, 2002.
- BOHM, W. *Methods of studying root systems*. New York: Springer-Verlag, 1979.
- BOONE, F.R.; VEEN, B.W. The influence of mechanical resistance and phosphate supply on morphology and function of maize roots. *Neth. J. Agric. Sci.*, 30:179-192, 1982.
- BORGES, G. A história de Herbert Bartz – Pionero do sistema plantio direto no Brasil e na América Latina. *R. Plantio Direto*, 1997.
- CASÃO Jr., R.; ARAÚJO, A.G. DE; LANILLO, R.F. *Plantio direto no Sul do Brasil: Fatores que facilitaram a evolução do sistema e o desenvolvimento da mecanização conservacionista – Londrina: IAPAR, 2012. 77 p.: il. ISBN: 978-85-88184-40-4.*
- CEPIK, C.T.C.; TREIN, C.R.; LEVIEN, R.; CONTE, O. Força de tração e mobilização do solo por hastes sulcadoras de semadoras-adubadoras. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, 14:561-566, 2010.
- CHEN, G.; WEIL, R.R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil Till. Res.*, 117:17-27, 2011.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008.
- COLONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *Eur. J. Agron.*, 33:242-249, 2010.

COSTA, F.S.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:323-332, 2008.

De MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; BACALTCHUK, B.; SATTLER, A.; DENARDIN, N.D'A.; FAGANELLO, A.; WIETHÖLTER, S. Sistema plantio direto: fator de potencialidade da agricultura tropical brasileira. In: ALBUQUERQUE, A.C.S.; SILVA, A.G. Agricultura tropical: quatro décadas de inovações tecnológicas, institucionais e políticas. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 1:1251-1273, 2008.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A. 15 de abril dia nacional da conservação do solo: a agricultura desenvolvida no Brasil é conservacionista ou não? *Bol. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo*, 36:10-15, 2011.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; ROTH, C.H. Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.*, 8:253-263, 1986.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. *Soil Till. Res.*, 20:87-100, 1991.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1713-1722, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ed. Rio de Janeiro, 306p. 2013.

FOLONI, J.S.S; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:947-953, 2003.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, M.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. *Bragantia: R. Ci. Agrônômicas*, 66:477-486, 2007.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; LEONEL, C.L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. I – Características de planta, solo e índice S. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:793-803, 2009.

GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. *Pesq. Agropec. Bras.*, 45:1489-1498, 2010.

GENRO Jr., S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:477-484, 2004.

- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.*, 53:71-85, 2000.
- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.*, 82:121-145, 2005.
- HORN, R.; PETH, S. Soil structure formation and management effects on gas emission. *Biologia*, 64:449-453, 2009.
- IMHOFF, S.; KAY, B.D.; SILVA, A.P.; HAJABBASI, M.A. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil Till. Res.*, 106:303-310, 2010.
- JORGE, L.A.C.; RODRIGUES, A.F.O. Safira: sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 20p., 2008 (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 24).
- LIMA, C.L.R.; MIOLA, E.C.C.; TIMM, L.C.; PAULETTO, E.A.; SILVA A.P. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 124:190-195, 2012.
- MACHADO, P.L.O.A.; SILVA, C.A.. Soil management under no-tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61:119-130, 2001.
- MARTINS, M.R.; CORÁ, J.E.; JORGE, R.F.; MARCELO, A.V. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil Till. Res.*, 104:22-29, 2009.
- NEUMANN, G.; ROMHELD, V. The release of root exudates as affected by the plant's physiological status. In: PINTON, R.; VARANINI, Z.; NANNIPIERI, P. The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil plant interface. New York, Marcel Dekker, 41-93, 2001.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242-254, 2009.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. How a corn plant develops. Ames: Iowa University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, 21 p, 1993. (Special Report 48).
- SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ci. Rural*, 39:58-64, 2009.
- SELLES, F; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till. Res.*, 44:23-34, 1997.
- SILVA, R.B., MASQUETTO, B.J., LANÇAS, K.P. Desenvolvimento e automação de um consolidômetro com interface homem máquina. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Gramado. Conquistas e Desafios da Ciência do Solo Brasileira. SBCS, Viçosa, 2007.
- SILVA, S.R.; BARROS, N.F.; COSTA, L.M. Atributos físicos de dois Latossolos afetados pela compactação do solo. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambient.*, 10:842-847, 2006.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two brazilian oxisols under no-tillage. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:35-43, 2009.

SOANE, B.D.; BLACKWELL, P.S.; DICKSON, J.W.; PAINTER, D.J. Compaction by agricultural vehicles: a review. *Soil Till. Res.*, 1:373-400, 1981.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil Research*. 51:311-321, 2013.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:725-730, 2001.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:393-99, 1999.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Unger Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy journal*, 86:759-766, 1994.

Van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil Till. Res.*, 92:104-113, 2007.

VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern brazilian hapludox. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1437-1446, 2008.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:487-494, 2005.

6. ARTIGO III: Agregação de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto após o manejo mecânico da compactação do solo

6.1. Resumo

A escarificação do solo sob plantio direto pode acelerar a mineralização do carbono orgânico afetando a sua agregação. A melhoria física proporcionada pelas hastes escarificadoras na camada compactada, por outro lado, ao intensificar o desenvolvimento de raízes em profundidade, pode levar ao aumento do teor de carbono orgânico e à agregação do solo nas camadas mais profundas. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do manejo mecânico da compactação do solo, mediante escarificação e uso de semeadora com hastes sulcadoras de ação profunda (0,17 m), na agregação de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto há mais de 10 anos. Dois estudos foram montados: no estudo 1, os tratamentos são constituídos pela profundidade de ação das hastes sulcadoras da semeadora usada para a semeadura das culturas de verão, durante dois anos, sendo: T₁ = haste sulcadora agindo até 0,05 m; T₂ = haste sulcadora agindo até 0,07 m; T₃ = haste sulcadora agindo até 0,17 m de profundidade; no estudo 2 os tratamentos se constituem do tempo decorrido da escarificação do Nitossolo Vermelho até a implantação da última cultura antes da avaliação, sendo: zero; seis; doze; dezoito e vinte e quatro meses e plantio direto contínuo (testemunha). O efeito destes tratamentos sobre a agregação do solo, no perfil de 0-0,3 m de profundidade, foi realizado mediante a avaliação dos atributos do solo: carbono orgânico; estabilidade em água de agregados em classes de tamanho (C1 = 9,52-4,76 mm; C2 = 4,76-2,0 mm; C3 = 2,0-1,0 mm; C4 = 1,0-0,25 mm; C5 = 0,25-0,105 mm e C6 = < 0,105 mm); diâmetro médio ponderado; agregados maiores que 2 mm; e macro e microagregados. O desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays* L.) foi avaliado e correlacionado com os parâmetros de agregação do solo. O uso da semeadora com haste sulcadora de ação profunda (0,17 m), durante dois anos, não afetou a agregação do solo. A escarificação tradicional, porém, diminuiu o tamanho dos agregados do solo, na camada 0,07-0,17 m, nos primeiros seis meses após a prática os quais retornaram ao estado original posteriormente. O desenvolvimento radicular favorecido na camada 0,07-0,20 m pela ação das hastes escarificadoras, não influenciou a agregação do solo.

6.2. Introdução

Os atributos físicos do solo relacionados à produtividade das culturas são separados em dois grupos: os que exercem influência direta como a água, o oxigênio, a temperatura e a

resistência à penetração e os que exercem influência indireta como a densidade, a agregação e a porosidade (Letey, 1985). A água participa da fotossíntese, da absorção e do transporte de nutrientes e mantém a turgidez celular (Epstein & Bloom, 2006). A absorção de água e de nutrientes do solo é realizada pelas raízes. Estas têm seu avanço afetado pela resistência do solo à penetração (Imhoff et al., 2010). O oxigênio participa da respiração liberando a energia essencial para a absorção de nutrientes do solo (Epstein & Bloom, 2006).

A estrutura do solo resulta do arranjo das partículas do solo e do espaço poroso entre elas, podendo ser descrita pela forma, pelo tamanho e pelo arranjo dos agregados (Brady & Weil, 2013). Os parâmetros que afetam a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água e calor, a permeabilidade do solo ao ar, água e raízes e a disponibilidade de nutrientes às plantas estão diretamente relacionados à estrutura do solo. Logo, na visão agrícola, a estrutura pode ser considerada a propriedade mais importante do solo (Ferreira et al., 1999).

A avaliação estrutural de um solo pode ser realizada através de parâmetros ligados ao tamanho e à estabilidade dos seus agregados, tais como: Diâmetro Médio Ponderado (DMP); Diâmetro Médio Geométrico (DMG); agregados maiores que 2 mm; e macro e microagregados (Tisdall & Oades, 1982). Estes se correlacionam positivamente com a porosidade, a condutividade hidráulica e permeabilidade do solo (Brady & Weil, 2013; Oliveira et al., 2013; Roth et al., 1991) e, negativamente, com a densidade do solo e a resistência à penetração. Solos bem estruturados, portanto, propiciam condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

A agregação e a estabilidade de agregados no solo é função do crescimento de raízes, microrganismos, fauna edáfica e fenômeno de expansão e contração que ocorrem no solo, e das forças físico-químicas que resultam na floculação dos colóides e na formação de agregados microscópicos (Baver et al., 1973; Six et al., 2002). Tipos de cátions, ponto de carga zero, pH, mineralogia, cargas coloidais (Ferreira et al., 1999) e a matéria orgânica do solo (Tisdall & Oades, 1982; Six et al., 2002) atuam na floculação coloidal. Os sistemas de cultivo influenciam positiva ou negativamente a agregação do solo, em face das espécies vegetais cultivadas (Silva & Mielniczuk, 1997; Colonego & Rosolem, 2008), do manejo físico e químico do solo (Castro Filho et al., 1998; Albuquerque et al., 2000) e do manejo dos restos culturais (Veiga et al., 2009).

A camada superficial do solo, em plantio direto, é freqüentemente mobilizada pelos elementos rompedores de solo das semeadoras utilizadas para a semeadura das culturas de verão e de inverno (Genro Jr. et al., 2004). Nesta camada a concentração de raízes (De Maria et al., 1999) e de carbono orgânico é maior que na camada subsuperficial compactada (Reichert et al., 2009). No plantio direto praticado na Região Subtropical Úmida do Brasil, entretanto, o

modelo de produção adotado não tem garantido aporte de material orgânico ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatíveis com a demanda biológica do solo (Denardin et al., 2009).

A escarificação mecânica do solo, prática alternativa para aliviar a compactação do solo sob plantio direto (Klein et al., 2009), pode acelerar a mineralização do carbono orgânico do solo por elevar a oxigenação e a temperatura do solo (Wendling et al., 2005). As hastes escarificadoras podem atuar no solo diminuindo o tamanho dos agregados, à semelhança do que ocorre no preparo convencional do solo (Colonego & Rosolem, 2008; Fabrizzi et al., 2009).

Por outro lado, a escarificação do solo melhora as condições físicas do solo (Klein et al., 2009) promovendo o desenvolvimento radicular na camada 0,05-0,20 m. O desenvolvimento de raízes pode promover aumento no teor de carbono orgânico e na formação de macroagregados, nessa camada, alterando o estado de agregação do solo (Silva & Mielniczuk, 1997). Há estreita relação entre teor de carbono orgânico e estabilidade de agregados (Castro Filho et al., 1998; Salton et al., 2008). Segundo Colonego & Rosolem (2008), após um ano de cultivo de triticales em um Latossolo Vermelho sob plantio direto, ocorreu aumento na porcentagem de agregados maiores que 2 mm, no DMG e no DMP do solo na camada 0,05-0,10 m, até então compactada, porém, a escarificação do solo proporcionou a diminuição destes índices.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do manejo mecânico da compactação do solo, em um curto período, na agregação da camada compactada de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto há mais de 10 anos na Região Subtropical Úmida do Brasil.

6.3. Material e métodos

Caracterização experimental

No campo experimental da Embrapa Trigo (28°11'20'' S, 52°19'62'' W) um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico (Embrapa, 2013) vinha sendo conduzido há mais de 10 anos sob plantio direto no modelo de produção constituído pela sucessão das culturas: soja (*Glycine max* (L.) Merr.) - trigo (*Triticum aestivum* L.). Nesta área, em 09/2009, foram montados dois ensaios, referenciados como Estudo 1 e Estudo 2, descritos a seguir.

Estudo 1 - Ação das hastes sulcadoras de semeadora na agregação do solo: no período entre 09/2009 e 03/2012 foram semeadas no Nitossolo Vermelho sob plantio direto (área supracitada) milho (*Zea mays* L.) 09/2009; trigo 03/2010; soja 10/2010; centeio (*Secale cereale* L.) 03/2011; e milho 09/2011. As culturas de verão (soja e milho) foram semeadas

com uma semeadora equipada com disco liso, haste sulcadora ajustável para operar até 0,17 m de profundidade, para abrir o sulco de semeadura e posicionar o fertilizante no solo, discos duplos defasados, para posicionar a semente no solo e roda em forma de “V”, para fechar o sulco de semeadura. Os tratamentos se constituíram das profundidades de ação das hastes sulcadoras, quais sejam: T₁ = haste sulcadora agindo até 0,05 m de profundidade; T₂ = haste sulcadora agindo até 0,07 m de profundidade; T₃ = haste sulcadora agindo até 0,17 m de profundidade.

Estudo 2 – Efeito da escarificação do solo na agregação: em uma área de 2.515 m² foram alocados quatro blocos e em cada bloco seis parcelas. A cada seis meses o solo de uma parcela por bloco, foi escarificado com escarificador dotado de cinco hastes espaçadas 0,3 m entre si, até aproximadamente 0,25 m de profundidade. Após a escarificação foram introduzidas as culturas que seguem: em 09/2009 - milho; 03/2010 - trigo; 10/2010 - soja; 03/2011 – centeio; e 09/2011 - milho. Os tratamentos foram constituídos do tempo decorrido da escarificação até a implantação da última cultura antes da avaliação (milho - 09/2011), sendo: 0 (Esc 0); 6 (Esc 6); 12 (Esc 12); 18 (Esc 18); e 24 (Esc 24) meses após a escarificação. Uma parcela por bloco não foi escarificada, sendo considerada a testemunha. O delineamento experimental, nos dois estudos, consistiu em blocos ao acaso, com quatro repetições.

Amostragem e determinações

Em março de 2012, após a colheita do milho semeado em 09/2011, nas camadas 0-0,07, 0,07-0,17, 0,17-0,20 e 0,20-0,30 m, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, utilizando cilindros de aço (54,3 cm³), para determinar a densidade e porosidade do solo (Donagema et al., 2011) e a resistência do solo à penetração mecânica (Lima et al., 2012).

Nas mesmas camadas foram coletas amostras deformadas que foram encaminhadas ao Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” onde foram espalhadas em tabuleiros de madeira, para secarem à sombra até atingirem a umidade correspondente ao ponto de friabilidade. A seguir foram passadas em peneira de 9,52 mm de abertura de malha, destorroando os agregados maiores nos seus planos de fraqueza, e posteriormente parte destas passadas em peneira de 2,0 mm para as determinações da granulometria (Donagema et al., 2011), carbono orgânico total (COT) pelo método Walkley-Black (Donagema et al., 2011), argila dispersa em água (ADA) pelo método da pipeta (Day, 1965) e agregados estáveis em água.

A determinação do tamanho e estabilidade dos agregados em água foi feita seguindo o método descrito por Kemper & Chepil (1965), adaptado por Palmeira et al. (1999), utilizando o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936). Cada amostra de terra seca ao ar foi homogeneizada e quarteada, obtendo-se quatro subamostras com agregados distribuídos uniformemente. Dessas quatro subamostras, três foram utilizadas para a determinação do tamanho e estabilidade dos agregados e uma para a determinação do conteúdo de água.

No aparelho de Yoder, as amostras correspondentes a 50 g de amostra seca em estufa foram colocadas sobre papel de filtro previamente adaptado na peneira superior de um jogo de peneiras com abertura de malha de 4,76; 2,0; 1,0; 0,25 e 0,105 mm. O papel de filtro teve a finalidade de evitar a distribuição do material nas peneiras antes da saturação por água. O conjunto de peneiras foi regulado de forma que a lâmina de água atingisse a porção inferior da amostra colocada na peneira de maior diâmetro e garantisse, dessa forma, o umedecimento da amostra por capilaridade. A amostra foi mantida nessa posição por um período de 10 minutos. Decorrido esse tempo, foi retirado o papel de filtro e iniciou-se, então, a tamisagem das amostras por um período de 10 minutos, com o aparelho regulado para efetuar 36 oscilações verticais em um percurso de 3,5 cm, por minuto. Dessa forma, os agregados se distribuíram nas peneiras de acordo com sua estabilidade e tamanho. Esse material foi transferido para cápsulas de alumínio e seco em estufa a 105 °C por um período de 24 h e pesado em balança de precisão. Após, foi submerso em solução de hidróxido de sódio 1 mol L⁻¹ a 6% durante uma noite. Procedeu-se, então, a lavagem do material na mesma peneira que lhe deu origem, obtendo-se, assim, após seco em estufa, o material inerte (cascalho, areia, restos de cultura).

Para calcular a porcentagem de agregados estáveis em água nas diferentes classes de tamanho (C1 = 9,52-4,76 mm; C2 = 4,76-2,0 mm; C3 = 2,0-1,0 mm; C4 = 1,0-0,25 mm; C5 = 0,25-0,105 mm e C6 = < 0,105 mm), e o DMP, utilizou-se as Equações 1 e 2, respectivamente (Palmeira et al, 1999). Os agregados foram separados ainda em: agregados maiores que 2 mm (A>2 mm); macro (>0,25 mm) e microagregados (<0,25 mm), conforme Tisdall & Oades (1982).

$$AGRi = \left[\frac{(MAGRi - mi)}{\sum_{i=1}^n (MAGRi - mi)} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

$$DMP = \left[\frac{\sum_{i=1}^n DMi (MAGRi - mi)}{\sum_{i=1}^n (MAGRi - mi)} \right] \quad (2)$$

Onde:

AGRi = proporção de agregados estáveis em água em determinada classe (i);

MAGR_i = massa de agregados + material inerte na classe *i*;

m_i = massa de material inerte (cascalho, areia, raízes, restos de cultura) na classe *i*;

DM_i = diâmetro médio da classe *i* (mm).

Avaliação do sistema radicular das plantas de milho

O sistema radicular do milho foi avaliado quando as plantas se encontravam no estágio fenológico R3. Em todas as parcelas foram coletados, com placa de pregos de 0,6 x 0,3 x 0,05 m, monólitos de solo correspondente a nove dm³, conforme Bohm (1979). Após a coleta, nas placas, as raízes foram lavadas, permanecendo nas suas respectivas posições. Após as raízes serem limpas, cada monólito foi dividido em três camadas no sentido vertical (0,0-0,05; 0,05-0,17; 0,17-0,30 m). As raízes contidas em cada camada foram secas em estufa a temperatura de 65 °C, por 72 horas. Após secas, obteve-se a massa de matéria seca de raízes de cada amostra em balança de precisão de 0,0001 g. Através da relação entre a massa de matéria seca de raízes e o volume de solo de cada monólito, obteve-se a densidade radicular (kg m⁻³).

No monólito coletado para a avaliação do sistema radicular, foram coletadas também amostras de solo, nas camadas 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20; 0,20-0,30 m, para a determinação das concentrações de fósforo (Mehlich-1), potássio, cálcio, magnésio, alumínio e acidez potencial (H+Al) e pH em água, conforme Donagema et al. (2011). Os valores médios destes atributos químicos do solo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. pH em água, Fósforo (Mehlich-1), Potássio, Cálcio, Magnésio, Alumínio e H + Al do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico na área experimental.

Camada	pH	Fósforo	Potássio	Cálcio	Magnésio	Alumínio	H + Al
M	água	----- mg kg ⁻¹ -----		----- cmol _c kg ⁻¹ -----			
0,00 - 0,05	5,0	41,9	202,4	3,5	1,5	1,2	9,0
0,05 - 0,10	5,3	29,1	157,3	3,6	1,6	1,1	8,0
0,10 - 0,15	5,4	13,1	134,2	3,9	1,7	0,8	7,0
0,15 - 0,20	5,5	6,6	103,1	3,9	1,9	0,7	6,2
0,20 - 0,30	5,5	2,5	62,4	3,2	1,7	0,8	6,0

Análise estatística

Os dados dos Estudos 1 e 2 foram analisados separadamente. Obteve-se o desvio padrão amostral dos dados referentes à distribuição dos agregados estáveis em água em classes de tamanho. Para as variáveis agregados maiores que 2,0 mm (*A*>2 mm), macro e microagregados, DMP, COT, e ADA, após a realização da ANOVA, procedeu-se comparação média pelo teste

Tukey a 5% de probabilidade (comparação entre tratamentos na mesma camada); Foram realizadas correlações simples, tais como: densidade do solo versus resistência do solo à penetração, macroporosidade do solo, densidade radicular e parâmetros da agregação do solo (DMP, A>2 mm e macroagregados); e densidade radicular versus DMP, A>2 mm, e macroagregados.

6.4. Resultados e discussão

Estudo 1 – Ação das hastes sulcadoras de semeadora na agregação do solo

Não houve diferença estatística entre os tratamentos nas diferentes camadas de solo estudadas, independente do parâmetro avaliado (Tabela 2 e Figura 1). A profundidade de ação das hastes sulcadoras da semeadora, utilizada para semear as culturas de soja e milho nos dois anos de estudo, portanto, não influenciou na agregação do solo na camada 0,0-0,30 m.

Tabela 2. Agregados maiores que 2 mm (A>2 mm), macro (Macro) e microagregados (Micro), carbono orgânico total (COT), argila dispersa em água (ADA) e diâmetro médio ponderado (DMP) de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico cultivado sob plantio direto há mais de 10 anos, sendo há dois anos submetido a semeadura de soja e milho com semeadora equipada com hastes sulcadoras atuando a 0,05 (T1), 0,07 (T2) e 0,17m de profundidade (T3).

Tratamento	A>2 mm	Macro	Micro	COT	ADA	DMP
	----- % -----					--- mm ---
0,0-0,07 m						
T1	48,5	93,6	6,39	1,84	32,9	3,25
T2	49,1	92,4	7,56	1,98	30,3	3,25
T3	50,0	91,8	8,17	1,93	31,3	3,27
CV%	7,0	4,5	4,3	7,39	11,5	9,47
0,07-0,17 m						
T1	48,3	94,5	5,43	1,33	38,1	3,00
T2	51,1	94,3	5,74	1,24	36,7	2,96
T3	48,0	94,8	5,20	1,36	41,7	3,38
CV%	11,1	2,3	3,1	4,6	11,6	8,58
0,17-0,20 m						
T1	44,4	92,1	7,88	1,27	40,3	2,60
T2	47,9	93,3	6,67	1,26	38,7	3,09
T3	53,4	91,8	8,19	1,20	38,6	3,35
CV%	7,3	3,1	4,3	5,23	9,5	13,56
0,20-0,30 m						
T1	35,4	84,6	15,36	1,15	40,4	2,04
T2	38,3	88,7	11,33	1,17	43,3	2,41
T3	37,2	88,9	11,10	1,20	45,0	2,28
CV%	18,7	2,6	3,4	9,41	7,5	17,34

Obs.: Não houve diferença estatística entre tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

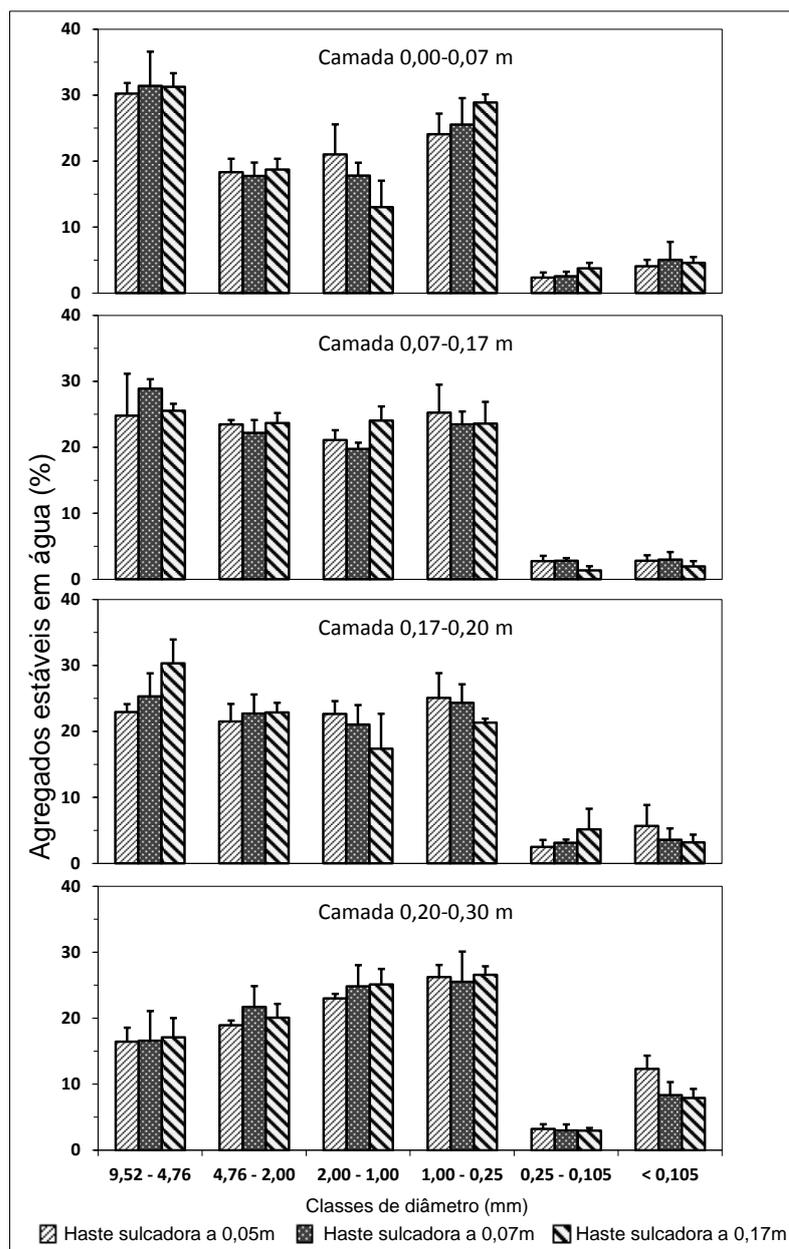


Figura 1. Distribuição de agregados estáveis em água, em classes de tamanho, de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto há mais de 10 anos e submetido à semeadura com semeadora equipada com hastes sulcadoras de 0,05; 0,07; e 0,17 m de profundidade. Barras verticais indicam o desvio padrão amostral dos dados.

O sistema radicular não influenciou os parâmetros de agregação do solo (Figura 2d, 2e e 2f) na camada 0,07-0,17 m. Portanto, a melhoria física do solo nesta camada, creditada à ação das hastes sulcadoras em profundidade (0,17 m), resultou apenas do efeito mecânico, sem melhorias efetivas na estrutura do solo. Esta assertiva é reforçada pelo fato da densidade do solo, indicativo da sua condição física, não ter correlação significativa com os parâmetros de agregação do solo (Figura 2g, 2h, 2i), na mesma camada (0,07-0,17 m).

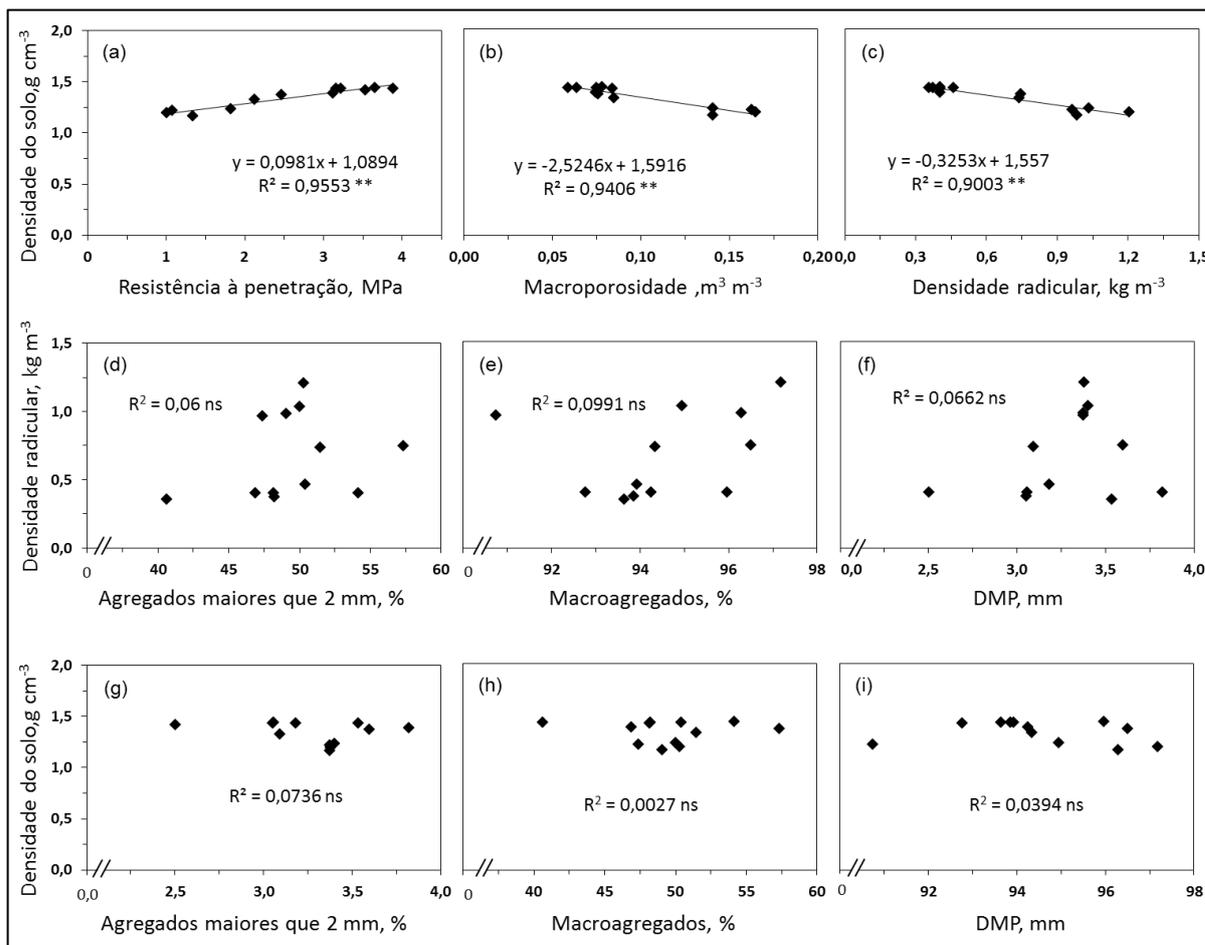


Figura 2. Correlações entre variáveis obtidas na camada 0,07-0,17 m de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico há mais de 10 anos sob plantio direto, e há dois submetido à semeadura das culturas de verão (soja e milho) com semeadora equipada com hastes sulcadora atuando a 5, 7 e 17 cm, sendo: densidade do solo versus macroporosidade do solo (a), resistência do solo à penetração (b) e densidade radicular das plantas de milho (c); densidade radicular das plantas de milho versus porcentagem de agregados maiores que 2 mm (d), porcentagem de macroagregados (e) e diâmetro médio ponderado (DMP) (f); densidade do solo versus porcentagem de agregados maiores que 2 mm (g), porcentagem de macroagregados (h) e DMP. Obs.: ns = correlação não significativa entre as variáveis e ** = correlação significativa a 1%.

O fato dos tratamentos não surtirem efeito, sobre a agregação do solo, deve-se, provavelmente, ao tipo de agregados desta camada (predominantemente formados por compressão), ao modelo de produção adotado anteriormente na área experimental e ao curto período de condução do ensaio.

Nos 10 anos que antecederam a implantação do estudo, o solo vinha sendo manejado sob plantio direto no modelo de produção constituído pela sucessão dos cultivos de soja na safra de verão e de aveia preta na safra de inverno. Somando os cultivos realizados durante a condução do estudo, da adoção do plantio direto até a data da coleta das amostras, foram

cultivadas onze safras de soja; dez de aveia preta; duas de milho; duas de centeio; e uma de trigo. Estes cultivos não aportaram material orgânico ao solo em quantidade e qualidade suficiente para manter o conteúdo de carbono no solo (Sá 1995), levando a sua degradação (Denardin et al., 2009) e dificultando a sua reestruturação.

O conteúdo de carbono do solo está diretamente relacionado à quantidade e qualidade de resíduos culturais que entram no sistema (Amado et al., 2001; Sá et al., 2001; Garcia & Rosolem, 2010). O cultivo de soja gera resíduo de baixa relação C:N - próximo de 15 - sendo rapidamente decompostos (Sá, 1995) e estimula a degradação do carbono oriundo dos cultivos anteriores por fornecer nitrogênio para a microbiota do solo (Sá et al., 2001). Sá et al. (2001) observaram decréscimo no conteúdo de carbono orgânico do solo 10 anos após a conversão de um campo nativo em lavoura sob plantio direto, creditando isso ao fato da mineralização da matéria orgânica ser maior que a deposição de material orgânico ao solo pelos cultivos realizados na área: sete de soja; três de milho; quatro de trigo; e seis de feijão preto, ou seja, assim como na área estudada, predominou o cultivo da soja.

Estudos que apontam melhorias na estrutura do solo, mediante cultivo de plantas de cobertura, geralmente são de longa duração e desenvolvidos com espécies que têm metabolismo C₄, sistema radicular agressivo e que geram resíduos com alta relação C:N (Castro Filho et al., 1998; Wendling et al., 2005; Garcia & Rosolem, 2010; Brandão & Silva, 2012). Plantas de milho deslocam para as raízes até 60% do carbono fixado via fotossíntese, do qual liberam até 70% na rizosfera (Neumann & Romheld, 2001), e geram resíduo de alta relação C:N. Estas plantas, portanto, apresentam potencial para promover a agregação do solo. Porém, do início deste estudo (09/2009) até a data da coleta do solo (03/2012) foram cultivadas apenas duas safras de milho, o que é insuficiente para aumentar o teor de carbono e promover melhorias efetivas na agregação do solo (Tabela 2).

Conforme Sá et al. (2001) e Six et al. (2002), o conteúdo de carbono orgânico do solo é altamente influenciado até 22 anos após a adoção do plantio direto. O fluxo contínuo de carbono, devido à humificação de compostos orgânicos, proporciona associações de carbono com agregados e partículas do solo, formando complexos organominerais estáveis (Golchin, 1994).

Deste contexto deduz-se que a utilização da semeadora-adubadora equipada com hastes sulcadoras de ação profunda (0,17 m), somente poderá promover melhorias efetivas na estrutura do solo na camada 0,07-0,20 m em plantio direto se o sistema agropecuário produtivo for planejado sem visão imediatista, adotando-se um modelo de produção que compreenda, além de soja, espécies com potencial para produzir resíduos em quantidade e qualidade (alta

relação C:N e alto teor de lignina) compatíveis com a demanda biológica do solo e as espécies utilizadas apresentarem sistema radicular denso e agressivo, como as gramíneas de verão.

Estudo 2 - Efeito da escarificação na agregação do solo

A escarificação do solo não afetou a agregação do solo nas camadas 0,0-0,07 e 0,20-0,30 m (Tabela 3 e Figura 3). Na camada 0,0-0,07 m, a hipótese de que a ação das hastas escarificadoras diminuem o tamanho dos agregados e o teor de carbono orgânico do solo por aumentar a mineralização da matéria orgânica (Mahboubiet al., 1993) foi rejeitada, o que pode ser corroborado por Torres et al.(1998) que afirma que a escarificação tem pequeno impacto na alteração do teor de matéria orgânica do solo.

De acordo com Lanças (2002) e Klein & Klein (2012), as hastas escarificadoras rompem o solo nas linhas de fraturas naturais dos agregados do solo, sem agredir a sua estrutura natural. A consistência friável do solo no momento da escarificação (Baver et al., 1973), o cultivo de plantas de cobertura após a escarificação (Colonego & Rosolem, 2008) e o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial do solo (Tabela 3) também contribuíram para a insignificante desagregação do solo devido à ação da escarificação.

No solo recentemente escarificado (Esc 0) a porcentagem de agregados maiores que 2 mm (Tabela 3) e maiores que 4,76 mm, na camada 0,07-0,17 m (Figura 3), e a porcentagem de agregados maiores que 4,76 mm, na camada 0,17-0,20 m (Figura 3), são significativamente menores em comparação ao plantio direto (PD). Nestas camadas (entre 0,07 e 0,20 m), portanto, a escarificação do solo diminuiu o tamanho e a estabilidade dos agregados do solo, nos primeiros seis meses depois da escarificação do solo.

O preparo convencional do solo, com arado e grade, promove a diminuição do tamanho dos agregados e do conteúdo de carbono orgânico do solo (Castro Filho et al., 1998; Calegari et al., 2006; Portella et al., 2012). Segundo Fabrizzi et al. (2009), neste manejo de solo, a degradação estrutural do solo deve-se à ação mecânica dos implementos utilizados no preparo do solo (efeito direto) e à diminuição do conteúdo de carbono orgânico do solo (efeito indireto). Neste estudo, entretanto, a escarificação não levou à diminuição do conteúdo de carbono do solo (Tabela 3), corroborando com Torres et al. (1998) e discordando de Mahboubi et al. (1993) e Araujo et al. (2004). A diminuição do tamanho dos agregados do solo, na camada 0,07-0,20 m, portanto, deve-se ao efeito direto, ou seja, mecânico e não da diminuição do carbono.

Tabela 3. Agregados maiores que 2 mm ($A > 2$ mm), macro (Macro) e microagregados (Micro), diâmetro médio ponderado (DMP), carbono orgânico total (COT) e argila dispersa em água (ADA) de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto (PD) há mais de 10 anos, submetido a semeadura de milho (*Zea mays* (L.)) após decorrer zero (Esc 0), seis (Esc 6), doze (Esc 12), dezoito (Esc 18) e vinte e quatro (Esc 24) meses da sua escarificação.

Tratamento	A > 2 mm	Macro	Micro	COT	ADA	DMP
	----- % -----					-- mm --
0,0-0,07 m						
PD	49,1	92,4	7,6	1,99	30,31	3,25
Esc 0	44,8	90,6	9,4	1,74	34,23	3,06
Esc 6	48,2	91,9	8,1	1,96	31,55	3,20
Esc 12	47,2	92,0	8,0	1,94	31,03	3,02
Esc 18	47,2	90,0	10,0	1,94	31,28	3,08
Esc 24	44,4	87,0	12,9	1,85	31,31	3,24
CV%	10,74	3,82	14,57	6,24	9,21	17,44
0,07-0,17 m						
PD	51,1 A	94,3	5,7	1,24	36,65	2,96
Esc 0	42,1 B	86,3	12,4	1,29	40,15	2,86
Esc 6	48,8 A	92,5	7,5	1,32	38,74	3,02
Esc 12	46,7 AB	93,0	7,0	1,24	45,42	3,04
Esc 18	47,0 AB	90,8	9,2	1,27	39,30	2,88
Esc 24	45,8 AB	90,5	9,5	1,26	37,80	2,83
CV%	5,94	3,27	13,4	5,77	8,01	15,30
0,17-0,20 m						
PD	47,9	93,3	6,67	1,26	38,66	3,09
Esc 0	43,6	92,8	7,18	1,25	41,58	2,79
Esc 6	43,5	92,2	7,77	1,24	40,95	2,60
Esc 12	47,7	87,1	12,94	1,17	42,76	2,78
Esc 18	47,1	88,6	11,43	1,25	44,69	2,95
Esc 24	44,5	90,7	9,29	1,24	42,03	2,85
CV%	7,10	4,48	11,04	6,21	7,90	15,34
0,20-0,30 m						
PD	38,3	88,7	11,33	1,17	43,38	2,41
Esc 0	36,9	90,1	9,99	1,21	41,59	2,35
Esc 6	37,4	89,5	10,75	1,14	40,90	2,25
Esc 12	36,4	86,9	13,71	1,13	44,50	2,08
Esc 18	34,0	85,8	14,17	1,18	45,00	2,15
Esc 24	33,2	85,8	14,17	1,21	43,75	2,08
CV%	9,47	4,39	10,3	7,55	8,38	17,50

Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, dentro de cada camada.

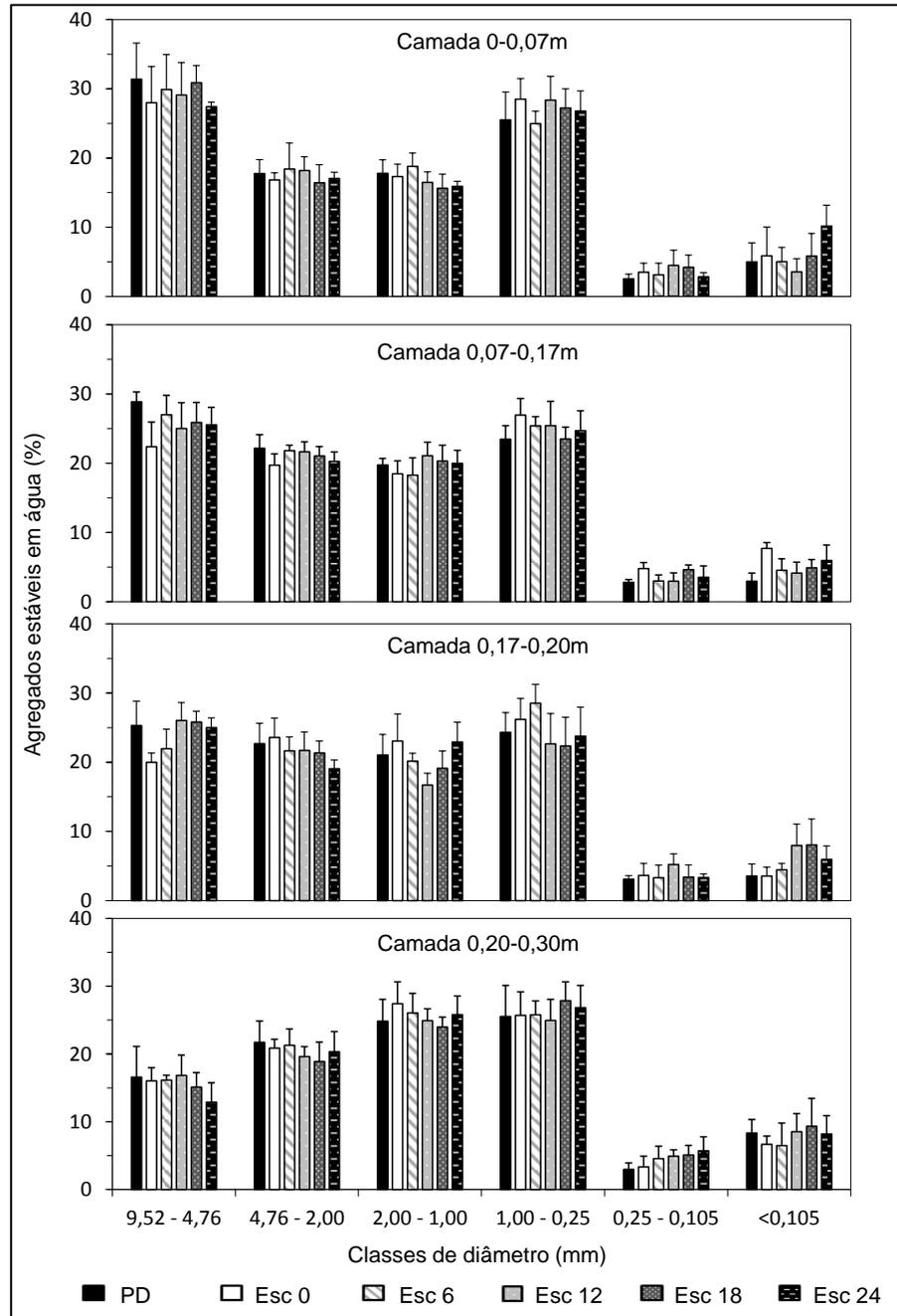


Figura 3. Distribuição de agregados estáveis em água, em classes de tamanho, de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico sob plantio direto (PD) há mais de 10 anos e após decorrer zero (Esc 0), seis (Esc 6), doze (Esc 12), dezoito (Esc 18) e vinte e quatro meses (Esc 24) da sua escarificação. Barras verticais indicam o desvio padrão amostral dos dados.

As hastas escarificadoras, embora não revolvam o solo como no preparo convencional, rompem a estrutura do solo, desagregando-o. A proposta de Lanças (2002) e Klein & Klein (2012), portanto, de que as hastas escarificadoras não agridem a estrutura do solo pode ser aplicada à camada 0,0-0,07 m e não à camada 0,07-0,20 m. Conforme Colonego & Rosolem (2008), a ação desagregadora das hastas escarificadoras é maior na camada subsuperficial do

solo do que na camada superficial, devido, provavelmente, ao menor conteúdo de carbono orgânico do solo (Tabela 3) em subsuperfície, em plantio direto.

Na camada 0,07-0,20 m, a escarificação promoveu a melhoria física imediata do solo proporcionando maior desenvolvimento de raízes, em relação ao solo mantido sob plantio direto há mais de dez anos (Artigo I). Nesta camada, há estreita relação entre a condição física do solo (representada pela densidade do solo) e o desenvolvimento radicular das plantas de milho (representado pela densidade radicular) (Figura 4c), e há relação significativa entre o desenvolvimento radicular e a porcentagem de agregados maiores que 2 mm (Figura 4d).

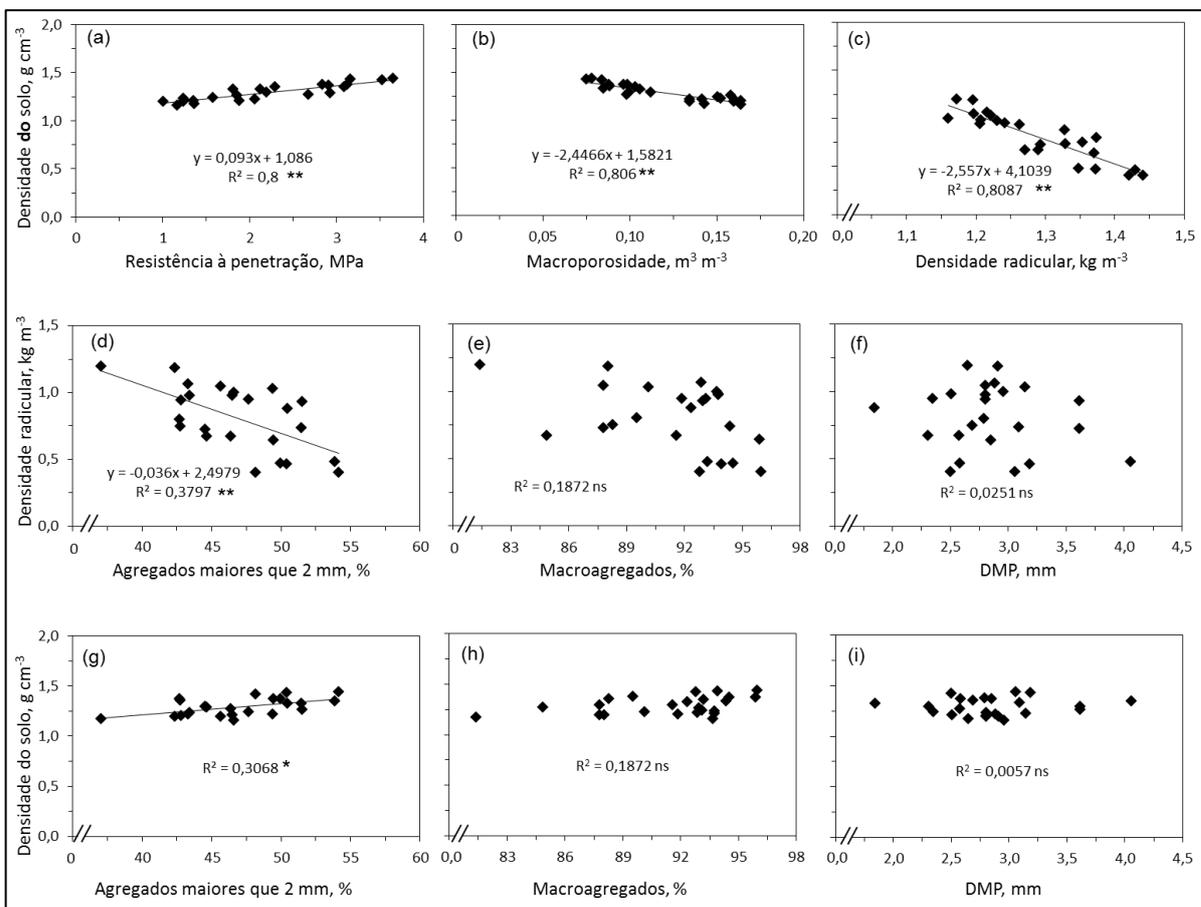


Figura 4. Correlações entre variáveis obtidas na camada 0,07-0,17 m de um Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico manejado há mais de 10 anos em plantio direto, e após decorrer zero, seis, doze, dezoito e vinte e quatro meses da sua escarificação, sendo: densidade do solo versus macroporosidade do solo (a), resistência do solo à penetração (b) e densidade radicular das plantas de milho (c); densidade radicular das plantas de milho versus porcentagem de agregados maiores que 2 mm (d), porcentagem de macroagregados (e) e diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados (f); densidade do solo versus porcentagem de agregados maiores que 2 mm (g), porcentagem de macroagregados (h) e DMP. Obs.: ns = correlação não significativa; * significativa a 5%; e ** = significativa a 1%.

Possivelmente o desenvolvimento radicular, favorecido na camada 0,07-0,20 m pela escarificação do solo, promoveu aumento no tamanho dos agregados, anulando o efeito negativo da ação das hastas escarificadoras observado nos primeiros seis meses depois da realização da prática. A partir dos seis até os vinte e quatro meses após a escarificação, entretanto, não se observou diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 3; Figura 3).

O efeito positivo proporcionado pelas raízes na agregação do solo está de acordo com Silva & Mielniczuk (1997), Garcia & Rosolem (2010) e Colonego & Rosolem (2008). É importante destacar, porém, que este efeito positivo foi observado apenas nos primeiros seis meses depois da escarificação e somente para o índice agregados maiores de 2 mm. Em nenhum momento depois da escarificação os parâmetros relacionados à agregação do solo, observados no solo escarificado, foram superiores àqueles observados no solo sob plantio direto.

Os dados indicam, portanto, que o efeito da escarificação sobre os parâmetros físicos do solo é efêmero e a agregação do solo na camada 0,07-0,20 m está relacionada ao desenvolvimento de raízes, favorecido apenas nos primeiros meses depois da escarificação (Artigo I), tempo insuficiente para promover acúmulo de carbono e a agregação do solo (Sá et al., 2001 e Six et al., 2002) na camada 0,05-0,20 m (Tabela 3). Neste sentido, é possível afirmar que a escarificação do solo em áreas sob plantio direto na Região Subtropical Brasileira não promove melhorias efetivas na estrutura do solo.

Adicionalmente, com exceção da porcentagem de agregados maiores que 2 mm, os parâmetros de agregação do solo não se correlacionam com a densidade do solo (Figura 4g e 4h). Disso deduz-se que a escarificação proporciona apenas o alívio imediato da compactação do solo sob plantio direto, na camada subsuperficial, sem constituir melhorias efetivas no sistema solo. Esta prática mecânica, por si só, pode tornar-se um engano no que tange à conversão do plantio direto ao sistema plantio direto, pois, ao proporcionar melhorias imediatas, induz os agricultores a continuar adotando modelos de produção que compreendem apenas o cultivo de soja no verão, dada a lucratividade desta cultura, e a alternativa de alívio da degradação (compactação do solo) causado pelo contínuo cultivo desta espécie. Isto gera uma falsa idéia de que o problema está sendo solucionado. Porém, conforme mencionado por Silva et al. (2012), após a escarificação do solo, a compactação pode retornar ainda mais severa.

6.5. Conclusões

A escarificação do solo diminuiu o tamanho dos agregados do solo, na camada 0,07-0,17 m, nos primeiros seis meses após a realização da prática os quais retornaram ao estado original posteriormente, porém, não afetou os teores de carbono orgânico do solo.

A utilização de semeadora equipada com hastes sulcadoras de ação profunda (0,17 m), para a semeadura das culturas de verão, durante dois anos, não afetou os teores de carbono orgânico e a agregação do Nitossolo Vermelho sob plantio direto.

O desenvolvimento radicular favorecido na camada 0,07-0,17 m, pela ação das hastes escarificadoras, neste estudo, não se correlacionou com os índices de agregação do solo, portanto, sem promover melhorias efetivas na estrutura do Nitossolo Vermelho sob plantio direto.

6.6. Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTANA, E.C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. R. Bras. Ci. Solo, 24:295-300, 2000.

AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. R. Bras. Ci. Solo, 25:189-197, 2001.

ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho Distroférico após treze anos de semeadura direta. R. Bras. Ci. Solo, 28:495-504, 2004.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDENER, W.R. Física de suelos. México: C.R.A.T./A.I.D., 1973,529p.

BOHM, W. Methods of studying root systems. New York: Springer-Verlag, 1979.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. The nature and properties of soils, 14 th ed. New Jersey: Pearson Education International, 2013.

BRANDÃO, E.D.; SILVA, I.F. Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. Ci. Rural, 42:1193-1199, 2012.

CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F. Melhoria da agregação do solo através do sistema plantio direto. Semina: Ci. Agr., 27:147-158, 2006.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.I. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em função de sistemas de plantio, rotação de culturas e métodos de preparo das amostras. R. Bras. Ci. Solo, 22:527-538, 1998.

COLONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1399-1407, 2008.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.545-567.

De MARIA I.C.; CASTRO O.M.; DIAS H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.

DENARDIN, J.E.; SCHAEFFER, R.; FAGANELLO, A.; KOCHHANN, R.A. Heterogeneidade física de um Latossolo argiloso manejado sob sistema plantio direto. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. 16 p. (Embrapa Trigo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento online, 70).

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). *Manual de métodos de análise de solos*. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2.ed. Rio de Janeiro, 2013. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de métodos de análises de solo*. 2ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2011. 230p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

FABRIZZI, K.P.; RICE, C.W.; AMADO, T.J.C.; FIORIN, J.; BARBAGELATA, P.; MELCHIORI, R. Protection of soil organic C and N in temperate and tropical soils: Effect of native and agroecosystems. *Biogeochemistry* 92:129–143,2009.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:515-524, 1999.

GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Agregados em um Latossolo sob sistema plantio direto e rotação de culturas. *Pesq. Agropec. Bras.*, 45:1489-1498, 2010.

GENRO Jr., S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:477-484, 2004.

GOLCHIN, A.; OADES, J.M.; SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P. Soil structure and carbon cycle. *Austr. J. Soil Res.* 32:1043–1068.

IMHOFF, S.; KAY, B.D.; SILVA, A.P.; HAJABBASI, M.A. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil Til. Res.* 106:303–310, 2010.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.

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

KLEIN, V.A.; KLEIN, C. As relações dos atributos físicos com o manejo do solo: estratégias e aplicações. In: XIX Reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água. *Conservação do Solo e da Água no Brasil: Preceitos e Ações no Ensino, na Pesquisa e na Extensão*. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2012. 05p. CD ROM.

LANÇAS, K.P. Subsolagem ou escarificação. *Cultivar Máquinas, set/out*, p.34-37. 2002.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, v.1, p.277-294, 1985.

LIMA, C.L.R.; MIOLA, E.C.C.; TIMM, L.C.; PAULETTO, E.A.; SILVA A.P. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 124:190-195, 2012.

MAHBOUBI, A.A.; LAL, R.; FAUSSEY, N.R. Twenty-eight years of tillage effects on two soil in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:506-512, 1993.

MARTINS, M.R.; CORA, J.E.; JORGE, R.F.; MARCELO, A.V. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil Till. Res.*, 104:22-29, 2009.

NEUMANN, G.; ROMHELD, V. The release of root exudates as affected by the plant's physiological status. In: PINTON, R.; VARANINI, Z.; NANNIPIERI, P. *The rhizosphere. Biochemistry and organic substances at the soil plant interface*. New York, 2001. P.41-93.

OLIVEIRA, P.R.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; ROSSETTI, K.V.; FERRAUDO, A.S.; FRANCO, H.B.J.; PEREIRA, F.S.P.; BÁRBARO JÚNIOR, L.S. Qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho submetido à compactação. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:604-612, 2013.

PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S.; SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:189-195, 1999.

PORTELLA, C.M.R.; GUIMARÃES, M.F.; FELLER, C.; FONSECA, I.C.B.; TAVARES FILHO, J.T. Soil aggregation under different management systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:1868-1877, 2012.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242-254, 2009.

ROTH, C.H.; PAVAN, M.A. Effect of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. *Geoderma*, 48:351-361, 1991.

SÁ, J.C.M. Rotação de culturas: Produção de biomassa e benefícios à fertilidade do solo; pg. 5 – 13. In: curso sobre manejo do solo em sistema de semeadura direta. 1995. Castro/PR, 344 p.

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.J. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1486-1499, 2001.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. R. Bras. Ci. Solo, 32:11-21, 2008.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de planta na formação e estabilização de agregados do solo. R. Bras. Ci. Solo, 21:113-117, 1997.

SILVA, S.G.C.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A.; SÁ, J.C.M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. R. Bras. Ci. Solo, 36:547-555, 2012.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M.; ALBRECHI, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. Agronomie, 22:755-775, 2002.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates. Soil. J. Soil Sci., 33:141-163, 1982.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; PICCININ, J.L.; FARIAS, J.R.B.; GALERANI, P.R.; GAZZIERO, D.L.P. Avaliação de sistemas de preparo do solo, rotação de culturas e semeadura da soja. In: Resultados de pesquisa da Embrapa Soja. Londrina, 1998. p.171-177.

VEIGA, M.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Aggregate stability as affected by short and long-term tillage systems and nutrient sources of a Hapludox in southern Brazil. R. Bras. Ci. Solo, 33:767-777, 2009.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. Pesq. Agropec. Bras., 40:487-494, 2005.

YODER, R. A direct method of aggregate analysis of soil and a study of the physical nature of erosion losses. J. Am. Soc. Agron., 28:337-351, 1936.

7. ARTIGO IV: Atributos físicos e químicos do solo sob plantio direto e o desenvolvimento radicular de milho

7.1. Resumo

O solo sob plantio direto apresenta uma superficial (0,0-0,07 m), física e quimicamente favorável ao desenvolvimento radicular das culturas, e uma subsuperficial (0,07-0,20 m), compactada e com Al^{3+} tóxico às plantas. A compactação do solo na subsuperfície é apontada como responsável pela concentração das raízes na camada superficial do solo nestas áreas. Porém, sabendo que tanto fatores físicos como químicos afetam o crescimento das raízes, questiona-se: a estratificação vertical dos atributos químicos do solo contribui para a concentração de raízes na camada superficial do solo sob plantio direto? Quais atributos mais limitam o crescimento radicular? A partir de que valor estes atributos afetam o desenvolvimento das raízes? Assim, o objetivo deste estudo foi identificar, de forma conjunta, os fatores físicos e/ou químicos do solo que afetam o desenvolvimento radicular das culturas na camada superficial em áreas sob plantio direto. Para tal, o relacionamento entre variáveis de morfologia radicular de milho e variáveis físicas e químicas de solo, obtidas na camada 0,0-0,07 e 0,07-0,17 m em plantio direto, foram avaliadas através de dispersão bivariada e, descritivamente, por meio de correlação canônica. Utilizando as variáveis de maior relevância para a relação “solo x raiz”, obtidas na análise de correlação canônica, procedeu-se a identificação de valores críticos ao desenvolvimento das raízes por meio de análise de regressão multivariada. Os resultados indicam que: na camada 0,07-0,17 m o desenvolvimento radicular está sendo severamente afetado pela degradação física do solo, sendo a resistência do solo à penetração o fator mais restritivo ao crescimento das raízes. Na mesma camada, a taxa de crescimento das raízes de milho diminui quando os valores de resistência do solo à penetração ultrapassam 1 MPa. Com valores de 3,88 MPa, a taxa de crescimento continua diminuindo linearmente com o aumento da resistência à penetração.

7.2. Introdução

A área mundial com plantio direto supera 116 milhões de hectares (FAO, 2013). Destes, 102 milhões se distribuem nos EUA, Brasil, Argentina, Austrália e Canadá (Derpsch et al., 2010), países ranqueados entre os maiores produtores mundiais de grãos. O plantio direto propiciou benefícios econômicos e ambientais nesses países (Derpsch et al., 2010), porém, a compactação do solo sob plantio direto é generalizadas nestas áreas (Shipitalo & Protz, 1987; Hubbard et al., 1994; Chen et al., 1998; Hakansson, 2005; Reichert et al., 2009).

O desenvolvimento de uma planta depende da habilidade desta em absorver água e nutrientes do solo, que, por sua vez, depende da capacidade da planta em desenvolver um extenso sistema radicular (Taiz & Zeiger, 2009). A compactação do solo, por afetar o desenvolvimento das raízes (Kay et al., 2006; Imhoff et al., 2010; Otto et al., 2011), pode diminuir a produtividade da planta (Clark et al., 2003; Chen & Weil, 2011) e, portanto, a produção mundial de alimentos.

Os fatores do solo que afetam a fisiologia das raízes podem ser divididos em fatores de natureza física e química. Os fatores físicos: resistência à penetração, oxigênio (O_2), água e temperatura se destacam, pois afetam diretamente o desenvolvimento vegetal (Letey, 1985).

O O_2 é fundamental para a respiração das raízes, que, fornece energia para processos metabólicos. Deficiência de O_2 no solo diminui a taxa de absorção e transporte ativo de íons pelas raízes (Epstein & Bloom, 2006) e a pressão exercida pelas raízes contra a matriz do solo (Blackwell & Wells, 1983; Taylor & Brar, 1991) e, portanto, o desenvolvimento vegetal.

No solo, a disponibilidade de O_2 é função do fluxo de O_2 , e este, da porosidade de aeração. De acordo com Kay et al. (2006), a porosidade de aeração ótima para o desenvolvimento de raízes de milho, em solos com diferentes texturas, é de 15%, sendo aceito, como valor de porosidade de aeração mínima, 10% da porosidade total do solo (Silva et al., 1994). Este valor, entretanto, depende da atividade biológica do solo e da tortuosidade do espaço poroso (van Lier, 2001). Em áreas sob plantio direto, dada a bioporosidade e a continuidade dos poros, este valor pode ser diferente (Tormena et al., 1999; Silva et al., 2004; Reichert et al., 2009).

A água participa da fotossíntese, da absorção e do transporte de nutrientes e mantém a célula túrgida, motivando o crescimento vegetal (Clark et al., 2003; Taiz & Zeiger, 2009). No solo, a água retida entre as tensões 10 kPa e 1.500 kPa é considerada disponível às plantas. Redução do potencial de água no solo afeta a divisão celular diminuindo, o comprimento radicular (Eavis, 1972).

A alongação radicular depende da pressão exercida pela região meristemática da raiz e da resistência do solo a sua penetração (Clark et al., 2003). O aumento da resistência do solo à penetração promove diminuição do comprimento, da área superficial e da massa de matéria seca radicular (Lipiec & Hatano, 2003; Silva et al., 2004; Imhoff et al., 2010; Otto et al., 2011). Vários autores consideram 2 MPa como valor crítico de resistência mecânica do solo à penetração de raízes (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1999). Este valor, porém, depende da textura, da umidade e do manejo do solo (Busscher, 1990; Pabin et al., 1998; Silva et al., 2004). Estudos para estabelecer valores críticos desta variável ao crescimento vegetal, portanto, ainda são necessários (Reichert et al., 2009; Imhoff et al., 2010).

Entre os fatores químicos do solo que afetam o desenvolvimento radicular destaca-se a toxidez por Al^{3+} . O Al^{3+} reduz a taxa de crescimento das raízes, diminuindo a área e o volume radicular, retém P em formas menos disponíveis na superfície das raízes e reduz a absorção, o transporte e a eficiência de água e nutrientes na planta (Zonta et al., 2006). A neutralização do Al^{3+} no solo, mediante calagem, promove aumento do comprimento das raízes e aumento da produtividade vegetal (Caires et al., 2008).

A camada “arável” (0,0-0,2 m) do solo sob plantio direto, normalmente, apresenta variabilidade vertical dos atributos físicos e químicos. É comum a presença de duas camadas distintas: uma superficial, aproximadamente 0 - 0,07 m, caracterizada por elevada porosidade de aeração, baixa densidade do solo, baixa resistência à penetração e pronunciada concentração de matéria orgânica e de nutrientes; e uma subsuperficial, 0,07 - 0,20 m, caracterizada por reduzida porosidade de aeração, elevada densidade do solo, elevada resistência à penetração e com a presença de Al^{3+} tóxico às plantas (Selles et al., 1997; De Maria et al., 1999; Caires et al., 2006; Reichert et al., 2009; Costa & Rosolem, 2007; Veiga et al., 2007; Pauletti et al., 2009; Costa et al., 2009; Nunes et al., 2011; Drescher et al., 2012).

A compactação do solo promove a concentração das raízes na camada superficial do solo nestas áreas (de Maria et al., 1999; Beutler & Centurion, 2004). Entretanto, com base nos fatores do solo que afetam o desenvolvimento radicular e nas características químicas e físicas do solo em plantio direto questiona-se: a estratificação vertical dos atributos químicos do solo contribui para a concentração de raízes na camada superficial do solo? Quais atributos, físicos e químicos, mais limitam o sistema radicular? A partir de que valor estes atributos afetam o desenvolvimento das raízes? A resposta destas perguntas poderia auxiliar na tomada de decisão quanto ao manejo físico e químico do solo sob plantio direto.

O objetivo deste estudo foi avaliar, de forma conjunta, a influência de atributos físicos e químicos de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto há mais de dez anos, no desenvolvimento de raiz de milho, identificar e quantificar os atributos que mais limitam o desenvolvimento radicular na camada 0,07-0,17 m do solo sob plantio direto.

7.3. Material e métodos

Os dados utilizados neste estudo provieram de experimentos de campo realizados para avaliar o efeito de métodos mecânicos de descompactação do solo e sua influência sobre o desenvolvimento radicular de milho (*Zea mays* L.), em um Nitossolo Vermelho sob plantio

direto há mais de 10 anos. Estes experimentos foram conduzidos na estação experimental da Embrapa Trigo (28°11'20'' S, 52°19'62'' W).

A caracterização da área experimental, o delineamento experimental, a metodologia empregada para coletar solo e sistema radicular das plantas e para determinar os atributos físicos e químicos do solo, bem como, obter as variáveis relativas à morfologia radicular das plantas de milho, estão descritos no Artigo I e no Artigo II desta dissertação.

Variáveis selecionadas para este estudo

Morfologia radicular: densidade, comprimento e volume de raiz de milho. Atributos físicos do solo: resistência à penetração, macroporosidade e capacidade de água disponível, por serem atributos físicos do solo diretamente relacionados ao desenvolvimento vegetal (Letey 1985) e utilizados na caracterização do Intervalo Hídrico Ótimo - indicativo da qualidade física do solo (Silva et al., 1994) – e, densidade do solo, por ser um atributo de fácil determinação. Atributos químicos do solo: pH, acidez potencial, alumínio, potássio, fósforo, cálcio e magnésio.

Uma vez que as hastes sulcadoras da semeadora atuaram até em torno de 0,17 m de profundidade (tratamentos aplicados no Artigo II) e a estratificação dos atributos físicos e químicos do solo sob plantio direto é maior nos primeiros 0,20 m do perfil do solo, optou-se por utilizar, neste estudo, apenas os dados gerados para as camadas 0,0-0,07 m e 0,07-0,17 m.

Análise estatística

As variações no relacionamento entre as variáveis de morfologia radicular e de solo, resultantes da estratificação causada pela compactação da camada subsuperficial (0,07-0,17 m), foram observadas por meio de gráficos de dispersão bivariada, distinguindo-se as observações feitas na camada superficial (0,0-0,07 m) e na camada subsuperficial (0,07-0,17 m). O grau de relacionamento entre as variáveis de raiz e de solo foi avaliado descritivamente por meio da análise de correlação canônica. A identificação de possíveis valores críticos para o desenvolvimento de raízes foi realizada por meio de análise de regressão multivariada, utilizando-se as variáveis de maior relevância para o relacionamento “solo x morfologia radicular”, obtidas na análise de correlação canônica.

7.4. Resultados

Nas figuras 1 e 2 são apresentados os gráficos de dispersão bivariada, para cada uma das variáveis de morfologia radicular variando-se as variáveis de solo, com distinção entre as observações feitas na camada superficial (0,0-0,07 m) e subsuperficial (0,07-0,17 m).

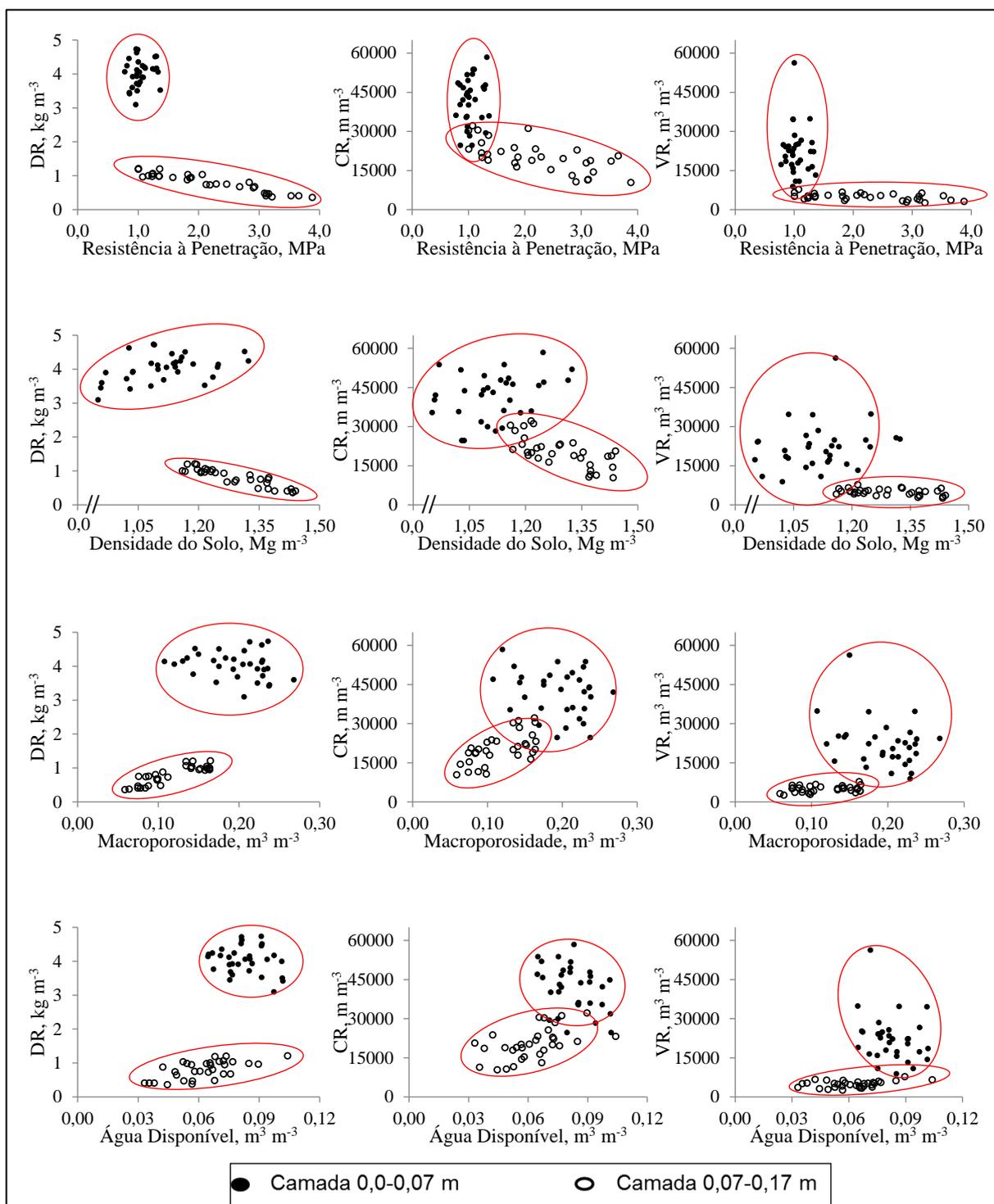


Figura 1. Gráficos de dispersão bivariada, para cada uma das variáveis de morfologia radicular - densidade (DR), comprimento (CR) e volume radicular (VR) - variando-se as variáveis físicas de solo, com distinção entre as camadas 0,0-0,07 m e 0,07-0,17 m.

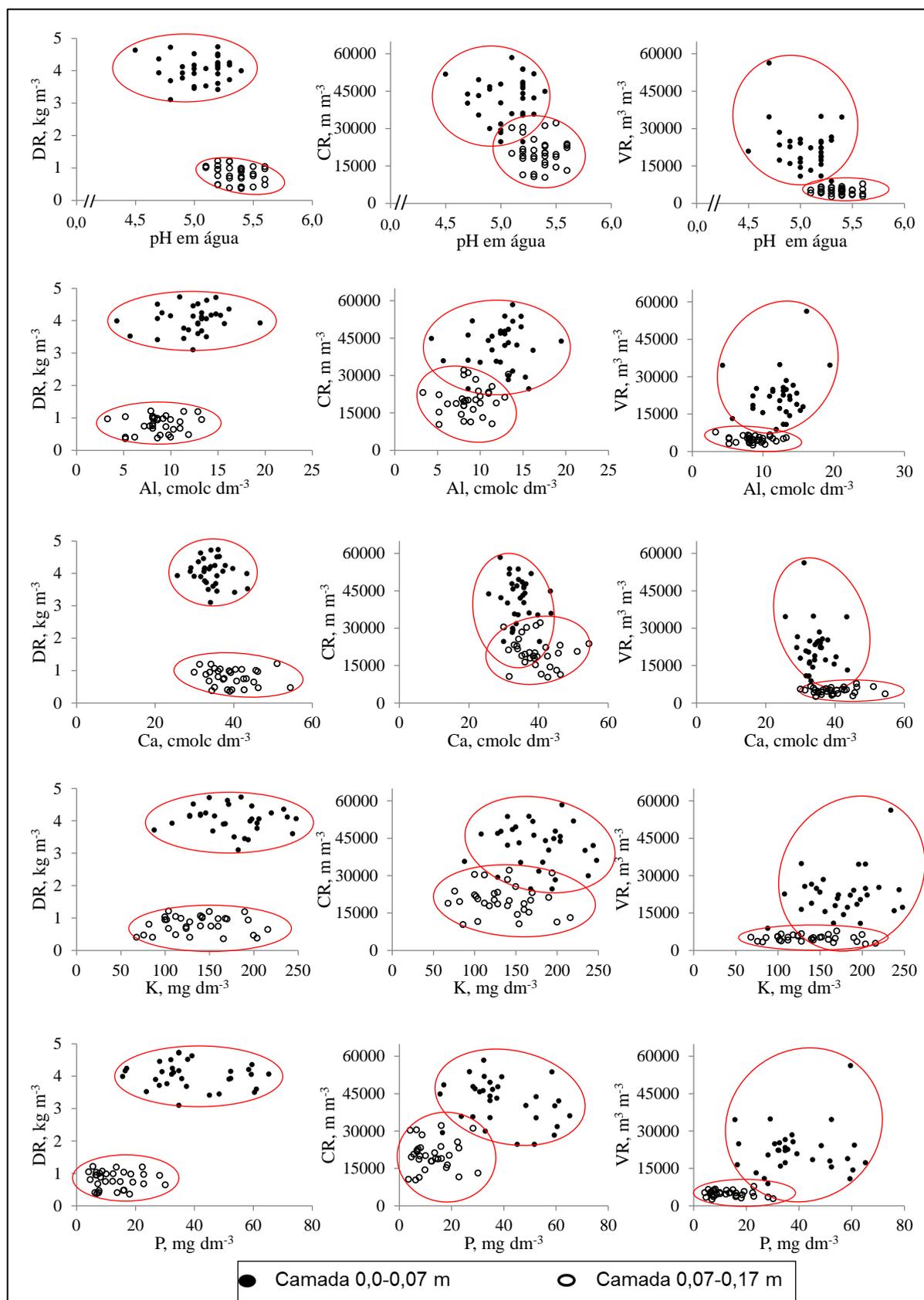


Figura 2. Gráficos de dispersão bivariada, para cada variável de morfologia radicular - densidade (DR), comprimento (CR) e volume radicular (VR) - variando-se as variáveis químicas de solo, com distinção entre as camadas 0,0-0,07 m e 0,07-0,17 m.

Nota-se, nestes gráficos, que independente da condição física e/ou química do solo no perfil de 0 a 0,17 m de profundidade, a concentração de raízes é maior na camada superficial em relação à subsuperficial. Mesmo quando estas camadas foram semelhantes quanto à fertilidade química e física, a densidade, o volume e o comprimento radicular foram menores na camada 0,07-0,17 m. A concentração de raiz de milho, portanto, é naturalmente superior nos primeiros cm do perfil do solo. Estes resultados estão de acordo com as observações feitas por Costa et al. (2009), que estudou a cultura do milho, e por Otto et al. (2011), que estudou cana-de-açúcar.

Estes gráficos também revelam a diferença na forma como as variáveis de morfologia radicular se relacionam com as variáveis físicas e químicas do solo nas diferentes camadas. Isto resulta da mudança de configuração do sistema devido à compactação do solo na camada 0,07-0,17 m. Existe, porém, variações no grau de diferenciação da relação entre as camadas, o que é mais e menos explícito para a variável densidade e comprimento de raiz, respectivamente. Na camada 0,0-0,07 m não há qualquer tendência clara no relacionamento entre as variáveis de raiz e de solo. As condições físicas e químicas do solo nesta camada, portanto, parece não estar afetando o desenvolvimento radicular. Já na camada 0,07-0,17 m são observadas tendências claras de relacionamento, sendo estas mais evidentes para as variáveis físicas do solo. As tendências no relacionamento com as variáveis físicas são explícitas para a variável densidade radicular.

Considerando as observações supracitadas, entende-se ser mais apropriado o tratamento em separado dos dados das duas camadas em análises posteriores. O tratamento conjunto poderia conduzir a interpretações equivocadas acerca do relacionamento entre as variáveis, o qual mostra diferenças claras, dadas as variações da configuração do sistema nas camadas de solo, bem como a distribuição natural do sistema radicular do milho no perfil do solo.

Na tabela 1 são apresentados os resultados da análise de correlação canônica e os testes da nulidade das correlações associadas aos n -ésimos autovalores, para as duas camadas do solo. Optou-se pela não apresentação do teste multivariado de nulidade do modelo de maximização da correlação, pois os resultados são equivalentes aos testes univariados para o primeiro autovalor.

Os dois primeiros autovalores estão associados às correlações canônicas de 0,63 e 0,57, explicando 48 e 36%, respectivamente, da covariância total entre os grupos de variáveis, porém, os resultados não significativos do teste de nulidade destas correlações confirmam o fraco relacionamento entre as variáveis de morfologia radicular e de solo na camada 0,0-0,07 m (Tabela 1). Conforme estes resultados as modificações ocorridas na condição física e química do solo, nesta camada, não se refletem no desenvolvimento radicular do milho. O menor nível

de fertilidade química e/ou física, portanto, já foi suficiente para garantir o pleno desenvolvimento do sistema radicular das plantas de milho, nesta camada.

Tabela 1. Correlações canônicas, proporção da covariância explicada pelo n-ésimo autovalor (Proporção), proporção acumulada da covariância explicada pelo n-ésimo autovalor (Proporção Acumulada), estatística Razão de Verossimilhança, estatística F aproximada, probabilidade associada à estatística F aproximada (p), entre os grupos de variáveis de morfologia radicular e atributos físico-químicos, previamente selecionadas, do Nitossolo Vermelho sob plantio direto.

Camada do Solo (m)	Autovalor	Correlação Canônica	Proporção	Proporção Acumulada	Razão de Verossimilhança	F aproximado	P
0,0-0,07	0,64	0,63	0,48	0,48	0,33802	0,72	0,837
	0,49	0,57	0,36	0,84	0,55633	0,65	0,849
	0,21	0,42	0,16	1,00	0,82701	0,46	0,881
0,07-0,17	16,07	0,97	0,94	0,94	0,02898	3,79	<0,001
	0,86	0,68	0,05	0,99	0,49467	0,80	0,696
	0,09	0,29	0,01	1,00	0,91805	0,20	0,992

Para a camada 0,07-0,17 m (Tabela 1) a hipótese nula foi descartada apenas para o primeiro autovalor, o qual está associado à correlação canônica de 0,97, e explica 94% da covariância total entre as variáveis de morfologia radicular e de solo. Nesta camada, há uma alta correlação entre o desenvolvimento radicular das plantas e as condições edáficas. Para as análises posteriores, portanto, foram considerados os dados da camada 0,07-0,17 m, sendo descartados os dados referentes aos valores associados ao segundo e terceiro autovalor.

Na tabela 2, são apresentados os coeficientes de cada variável dentro do modelo de maximização da covariância (pesos canônicos) - optou-se por apresentar os coeficientes obtidos a partir das variáveis originais padronizadas para remover o efeito da escala de mensuração e facilitar a interpretação dos resultados -, e as correlações simples entre os grupos das variáveis originais e suas respectivas variáveis canônicas (cargas canônicas) e as variáveis canônicas do grupo oposto (cargas canônicas cruzadas) para a camada 0,07-0,17 m.

Os valores dos pesos canônicos evidenciam a maior relevância da variável densidade radicular (0,899) e resistência à penetração (-0,911) nas combinações lineares referentes às variáveis canônicas de morfologia radicular (\hat{U}) e físico-química de solo (\hat{W}). Observa-se também, embora menos expressiva, a contribuição da variável volume radicular (0,171), em \hat{U} , e das variáveis densidade do solo (0,128), pH (0,207), cálcio (-0,207) e magnésio (0,221), em \hat{W} .

As elevadas cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas observadas para densidade radicular (0,99 e 0,96, respectivamente) e resistência à penetração (-0,98 e -0,95, respectivamente), confirmam a maior importância destas variáveis para o modelo de maximização

da correlação entre os grupos. Para a variável volume radicular, a associação entre baixos pesos canônicos e cargas canônicas e canônicas cruzadas moderadas, tornam esta variável um indicador razoável da morfologia radicular. Em relação às variáveis químicas do solo, as baixas cargas canônicas e canônicas cruzadas evidenciam a pouca utilidade destas variáveis para o modelo de predição do desenvolvimento radicular, mesmo que apresentem pesos canônicos não desprezíveis.

Tabela 2. Variáveis canônicas (\hat{U} e \hat{W}), coeficientes do modelo de maximização da covariância (pesos canônicos) para as variáveis originais padronizadas, coeficiente de correlação simples (cargas canônicas) entre as variáveis originais e as variáveis canônicas \hat{U} e \hat{W} , obtidas na camada 0,07-0,17 m de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto.

Variável Canônica	Pesos Canônicos Padronizados	Cargas Canônicas	
		\hat{U}	\hat{W}
Morfologia Radicular (\hat{U})			
Densidade de Raiz	0,899	0,99	0,96
Comprimento de Raiz	0,033	0,72	0,70
Volume de Raiz	0,171	0,53	0,51
Físico-Química de Solo (\hat{W})			
Densidade do Solo	-0,128	-0,91	-0,93
Resistência à Penetração	-0,911	-0,95	-0,98
Macroporosidade	-0,029	0,83	0,87
Água Disponível	0,090	0,65	0,67
pH	0,207	-0,22	-0,23
Acidez Potencial	0,052	0,01	0,01
Alumínio	0,046	0,14	0,15
Potássio	-0,068	0,02	0,03
Fósforo	-0,069	-0,06	-0,06
Cálcio	-0,207	-0,14	-0,15
Magnésio	0,221	-0,17	-0,17

Estes resultados mostram que, dentro do conjunto de variáveis físicas e químicas do solo, há um amplo predomínio do efeito do impedimento mecânico sobre o desenvolvimento de raízes na camada subsuperficial do solo em áreas sob plantio direto. A restrição do crescimento radicular nesta camada, portanto, deve-se, principalmente, à degradação física do solo, sendo a resistência do solo à penetração radicular o fator mais limitante.

Na tabela 3, são apresentados os coeficientes de correlação múltipla entre as variáveis originais de morfologia radicular e físico-químicas de solo, e as variáveis canônicas do grupo oposto. Os coeficientes de correlação múltipla entre as variáveis de morfologia radicular e \hat{W}

mostram que a combinação linear das variáveis físico-químicas de solo na variável canônica funciona como um bom preditor da variável densidade radicular, sendo, porém, um preditor razoável e fraco do comprimento e volume radicular, respectivamente. Para as variáveis físico-químicas de solo, os resultados mostram que a combinação linear das variáveis de morfologia radicular em \hat{U} , funciona como um bom indicador da qualidade física do solo e como um indicador pobre de sua fertilidade química, dados os coeficientes da correlação múltipla.

Tabela 3. Coeficiente de correlação múltipla entre as variáveis originais de cada grupo e a variável canônica do grupo oposto, obtidas na camada 0,07-0,17 m de um Nitossolo Vermelho sob plantio direto.

Variável Original	Variável Canônica
	\hat{W}
Densidade de Raiz	0,9142
Comprimento de Raiz	0,4824
Volume de Raiz	0,2646
	\hat{U}
Densidade do Solo	0,8211
Resistência à Penetração	0,9001
Macroporosidade	0,7151
Água Disponível	0,4234
pH	0,0477
Acidez Potencial	0,0000
Alumínio	0,0198
Potássio	0,0006
Fósforo	0,0033
Cálcio	0,0200
Magnésio	0,0285

Como os resultados anteriores evidenciam que, na camada 0,07-0,17 m, o relacionamento entre as variáveis de morfologia radicular e físicas do solo é claro, é possível o estabelecimento de uma relação funcional entre estas variáveis. Para tanto, as variáveis densidade e volume radicular, e resistência à penetração foram utilizadas, visto que estas apresentaram a maior contribuição para o relacionamento entre os grupos de variáveis (Tabela 2). Embora a análise anterior também tenha apontado certo grau de relevância para a variável densidade do solo, esta foi desconsiderada para as análises posteriores, em virtude de pressuposições de não colinearidade entre variáveis predictoras relacionadas ao algoritmo adotado.

A observação dos gráficos de dispersão entre as variáveis de morfologia radicular e a resistência à penetração (Figura 3), na camada subsuperficial, conduziu ao ajuste dos dados a

modelos polinomiais, visto que não é explícito qualquer outro tipo de relacionamento entre as variáveis. Procedeu-se a variação do grau dos polinômios ajustados, para verificação da possibilidade de existência de outro parâmetro dos modelos além da inclinação.

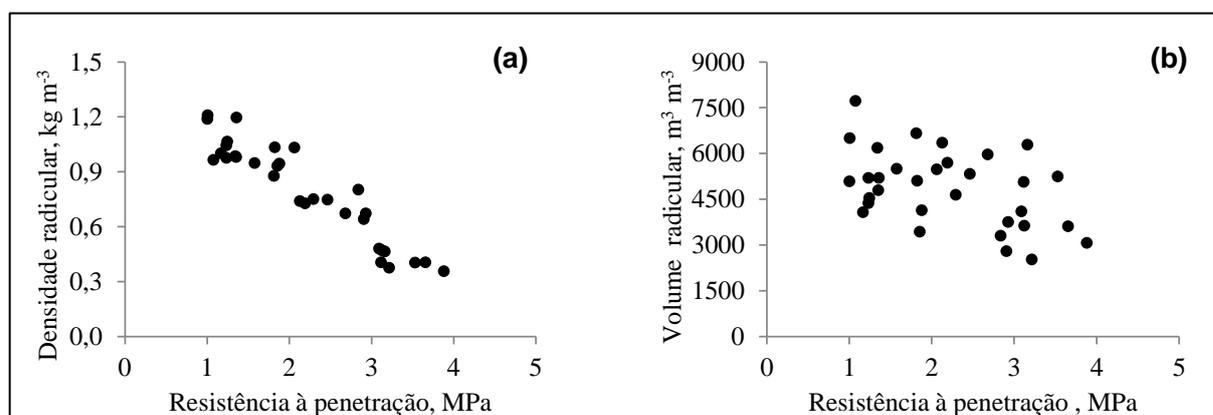


Figura 3. Dispersão entre as variáveis densidade (a) e volume radicular (b) versus a resistência do solo à penetração, obtidos na camada 0,07-0,17 m.

Os resultados da análise de regressão polinomial multivariada (Tabela 4) mostram que não há significância para os coeficientes quadráticos, o que evidencia a inexistência de pontos críticos da função, sendo a inclinação o único parâmetro relevante no modelo multidimensional. Estes resultados impossibilitam a atribuição de um valor crítico da variável resistência à penetração ao desenvolvimento de raízes de milho na camada subsuperficial, dentro do intervalo de valores estudados (1,01 a 3,88 MPa). Os valores restritivos ao desenvolvimento radicular de milho, na camada subsuperficial do solo em áreas sob plantio direto, podem ser, consideravelmente, mais elevados que o valor de 2 MPa, usualmente adotado pela pesquisa (Tormena et al, 1999).

Tabela 4. Polinômios, estatística Lambda de Wilks, estatística F aproximada e probabilidade associada à estatística F aproximada (p) para análise de regressão polinomial multivariada para densidade (DR) e volume radicular (VR) em função da resistência do solo à penetração.

Polinômio	Lambda de Wilks	F Aproximado	p	Polinômios Ajustados
1º Grau	0,10795	119,82	<0,0001	$\begin{bmatrix} \text{DR} \\ \text{VR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,43 - 0,285 R_p \\ 30321 - 4561 R_p \end{bmatrix}$
2º grau	0,9398	0,90	0,4195	$\begin{bmatrix} \text{DR} \\ \text{VR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,32 - 0,185 R_p - 0,22 R_p^2 \\ 35803 - 10120 R_p + 1207 R_p^2 \end{bmatrix}$

7.5. Discussão

Os resultados acima descritos possibilitam algumas inferências. A primeira diz respeito à derivação de informações sobre o relacionamento entre variáveis de solo e raiz, em áreas manejadas sob plantio direto, desconsiderando a estratificação que ocorre no perfil do solo nestas áreas. Os resultados (Figuras 1 e 2 e Tabela 1) evidenciam a grande diferença que há no comportamento destas variáveis, nas diferentes camadas de solo. A magnitude destas diferenças mostram as variações na configuração do sistema, devendo-se, neste caso, os dados de cada uma das camadas serem considerados como oriundos de populações distintas. A consideração conjunta dos dados das duas camadas conduziria a uma população com comportamento não normal (apêndice 2). Esta população, portanto, não poderia ser modelada por um algoritmo qualquer que pressuponha distribuição normal.

Em áreas sob plantio direto o uso de semeadora com elemento rompedor de solo e com mecanismos de deposição de fertilizante que atuam até a profundidade aproximada de 0,07 m concentra P e K nos primeiros cm do perfil do solo (Pauletti et al. 2009; Selles et al. 1997), na mesma profundidade, a calagem superficial diminui a acidez do solo e concentra Ca e Mg (Caires et al., 2006). Isto, aliado ao acúmulo de matéria orgânica na superfície, forma a camada superficial diferenciada. Nesta camada, os teores de nutrientes são muito maiores que os valores críticos de deficiência, ou seja, os menores teores encontrados são mais do que suficientes para o pleno crescimento das plantas. Logo, a variação dos teores dos nutrientes verificadas não se reflete no desenvolvimento radicular das plantas (Figura 2 e Tabela 1). O acúmulo de fertilizante nesta camada, portanto, pode não significar maior produtividade vegetal, proporcionado apenas maior custo para o agricultor. Os fertilizantes aplicados em excesso na superfície, entretanto, podem ser carregados pela água de enxurrada (Denardin et al., 2008) tornando-se contaminantes ambiental. Assim, o manejo da adubação nestas áreas poderia ser repensado, sobretudo no que tange à quantidade e à forma de aplicação.

Embora a estratificação vertical de atributos químicos do solo sob plantio direto seja clara, a degradação física do solo prepondera na limitação do desenvolvimento radicular das plantas na camada subsuperficial. Os resultados deste estudo revelam ainda, que a resistência do solo à penetração é o fator físico mais limitante ao crescimento radicular, nestas áreas. De fato, a qualidade física do solo sob plantio direto para o crescimento radicular, avaliada através do Intervalo Hídrico Ótimo, tem sido limitada pela elevada resistência do solo à penetração (Tormena et al., 1998, 1999 e 2007; Klein & Câmara, 2007; Collares et al., 2006). A elevação

da taxa de crescimento radicular na camada subsuperficial do solo sob plantio direto, portanto, depende, em primeiro lugar, da mitigação da degradação estrutural do solo.

O crescimento radicular é diretamente afetado pela resistência do solo à penetração (Letey, 1985). Este crescimento depende da divisão e do alongamento das células da região meristemática (coifa) da raiz (Zonta et al., 2006). Segundo Clarck et al. (2003), a elongação celular pode ser representado pelo modelo $R = m (P - Wc - \sigma)$, onde: R é a taxa de elongação celular; m é o coeficiente de extensibilidade da parede celular; P é a pressão de turgor; Wc é o limite de resistência da parede celular para a elongação; e σ , a resistência mecânica oferecida pelo solo. Assim, entende-se que: a elongação celular, e conseqüentemente o crescimento radicular, ocorre quando a pressão promotora da expansão ($P - Wc$) é maior que a resistência oferecida pela matriz do solo (σ); e o aumento da resistência do solo à penetração promove a diminuição gradual da taxa de elongação, não sendo, portanto, uma paralização abrupta.

Neste sentido, nota-se que a taxa de crescimento radicular diminui linearmente com o aumento da resistência do solo à penetração (Figura 3 e Tabela 4), considerando o intervalo de valores estudados (1,01 a 3,88 MPa). O desenvolvimento das raízes de milho na camada 0,07-0,17 m do solo sob plantio direto, portanto, passou a diminuir quando os valores de resistência do solo à penetração ultrapassaram o valor de 1 MPa.

Outros estudos também observaram que a taxa de desenvolvimento de raiz de milho começa a diminuir quando a resistência do solo à penetração aproxima-se de 1 MPa (Boone & Veen, 1982; Materechera & Mloza-Banda, 1997; Imhoff et al., 2010). Os mesmos, entretanto, ressaltam que a taxa de crescimento é severamente afetada quando a resistência do solo à penetração aproxima-se de 3 MPa. No presente estudo, considerando o intervalo de valores de 1,01 a 3,88 MPa, não foi possível evidenciar um valor de resistência à penetração crítico ao crescimento das raízes de milho. Isto indica que o valor de 2 MPa, tipicamente adotado como crítico ao crescimento radicular (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998 e 1999), possa não ser adequado para as condições de solo sob plantio direto.

Neste sentido, Reichert et al. (2009) sugerem que o valor de resistência do solo à penetração igual a 2 MPa, considerado crítico ao crescimento das plantas, não restringe o crescimento radicular das plantas no solo sob plantio direto. Anteriormente, Klein & Camara (2007) já haviam deduzido que este valor (2 MPa) não limita o crescimento de soja em solo sob plantio direto.

Silva et al. (2004) desenvolveram um experimento pelo qual demonstram que a resistência à penetração igual a 2 MPa não impede o crescimento de milho em solo sob plantio direto,

embora, diminua a taxa de crescimento. Estes autores discutem que as plantas respondem à condição desfavorável do solo controlando o seu desenvolvimento, de forma a tornar o carbono mais disponível para o crescimento das raízes. Este mecanismo aumentaria a chance das raízes superarem as condições adversas do solo. Esta teoria foi desenvolvida por Masle et al. (1990) e utilizada como argumento também por Imhoff et al. (2010). De fato, Lynch (1995) propõe que o crescimento e a atividade do sistema radicular apresentam custo metabólico significativo, especialmente quando a planta está sob estresse edáfico.

No solo sob plantio direto a atividade biológica promove uma rede de bioporos com maior continuidade e conectividade ao longo da matriz do solo, com reflexos no movimento de ar (Carter, 1992). Em hipótese, esses bioporos justificam o menor efeito da resistência à penetração no crescimento radicular, em solo sob plantio direto, uma vez que servem como rota alternativa para o crescimento radicular, mesmo que o solo apresente uma matriz mais densa, levando ao aumento dos valores críticos de resistência à penetração e de porosidade de aeração, nestas áreas (Tormena, et al., 1999; Silva, et al., 2004; Reichert, et al., 2009).

Segundo Liepic et al. (2012), a plasticidade morfológica das raízes de cereais possibilita o desenvolvimento em fendas estreitas. Considerando que no solo sob plantio direto há fendas, é possível que o crescimento das raízes não cessou com resistência à penetração relativamente elevada (3,88 MPa), por estas se desenvolverem nas fendas. Há de se considerar que a distribuição da resistência do solo à penetração e da umidade do solo não é uniforme, principalmente nas proximidades da raiz, o que facilitaria o desenvolvimento radicular. É de fundamental importância levar-se em conta, também, que a resistência mecânica do solo à penetração foi avaliada, unicamente, na condição de capacidade de campo (10 kPa) e que as raízes se desenvolveram no campo em variadas condições de umidade ou de tensão de água no solo.

O fato do crescimento radicular em subsuperfície, em solo sob plantio direto, ser limitado pela resistência do solo à penetração e que a escarificação do solo tem efeito efêmero sobre propriedades físicas do solo, leva a pensar que a semeadora equipada com haste sulcadora de ação profunda é útil para mitigar o efeito da compactação do solo sob plantio direto e diminuir o efeito negativo da degradação física do solo sobre a produção vegetal. Ao romper a camada subsuperficial compactada, diminuindo a resistência à penetração das raízes esta ferramenta favorece o desenvolvimento de plantas com maior volume, comprimento e densidade radicular (2º artigo), aumentando, desta forma, a absorção de água e nutrientes pelas plantas e a quantidade de matéria seca, diminuindo riscos de frustrações de safra por estresse hídrico.

7.6. Conclusões

O grau da relação entre as variáveis de solo e de morfologia radicular de milho, em áreas sob plantio direto, é diferente entre as camadas do solo. Na camada superficial (0,0-0,07 m), o desenvolvimento das raízes não foi afetado pelas condições edáficas, mais foi severamente afetado na camada subsuperficial (0,07-0,17 m).

A elevada resistência do solo à penetração é o principal fator limitante do crescimento radicular na camada subsuperficial do solo sob plantio direto. A estratificação vertical dos atributos químicos do solo nestas áreas contribui pouco para que as raízes das culturas concentrem-se na camada superficial do solo.

A taxa de desenvolvimento das raízes de milho, na camada subsuperficial do solo sob plantio direto, diminui linearmente quando os valores de resistência do solo à penetração ultrapassam 1 MPa. Valores de resistência à penetração de 3,88 MPa não foram críticos ao crescimento das raízes. Em áreas sob plantio direto, portanto, o valor de 2 MPa de resistência do solo à penetração, considerado limitante ao desenvolvimento da maioria das culturas, é inferior aos valores realmente limitantes.

7.7. Referências bibliográficas

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:581-588, 2004.

BLACKWELL, P.S., WELLS, E.A. Limiting oxygen flux densities for oat root extension. *Plant Soil* 73, 129–139. (1983).

BOONE, F.R., VEEN, B.W. The influence of mechanical resistance and phosphate supply on morphology and function of maize roots. *Neth. J. Agric. Sci.* 30, 179–192, 1982.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; ALLEONI, L.R.F. & CAMBRI, M.A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:87-98, 2006.

CARTER, M.R. Characterizing of soil physical condition in reduced tillage systems for winter wheat on a fine sandy loam using small cores. *Can. J. Soil Sci.*, 72:395-402, 1992.

CHEN, G.; WEIL, R.R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. *Soil Till. Res.*, 117:17-27, 2011.

CHEN, Y.; TESSIER, S.; ROUFFIGNAT, J. Soil bulk density estimation for tillage systems and soil textures. *Trans. ASAE* 41:1601–1610, 1998.

CLARCK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? *Plant Soil*, 255:93-104, 2003.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:1663-1674, 2006.

COSTA, A.; ROSOLEM, C.A. Liming in the transition to no-till under a wheat-soybean rotation. *Soil Till. Res.*, 97:207-217, 2007.

COSTA, S.E.V.G.A.; SOUZA, E.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; ANDRIGUETTI, M.H. Distribuição de potássio e de raízes no solo e crescimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1291-1301, 2009.

De MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; DIAS, H.S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:703-709, 1999.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A.; MANHAGO, D.D. "Vertical mulching" como prática conservacionista para manejo de enxurrada em sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2847-2852, 2008.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. & Biol. Eng.*, 2010.

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G.L. Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 36:1836-1884, 2012.

EAVIS, B. W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: 1- mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. *Plant Soil*, 36:613-622, 1972.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. Emanuel Epstein e Arnold J. Bloom. Trad. Maria Edna Tenório Nunes – Londrina, 2006. 403p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. *CA Adoption Worldwide*, 2013. Extraído de: <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html>

HAKANSSON, I. Machinery-induced compaction of arable soils. Reports from the division of soil management, Uppsala, no. 109, 153 p., 2005.

HUBBARD, R.K.; HARGROVE, W.L.; LOWRANCE, R.R.; WILLIAMS, R.G.; MULLINIX, B.G. Physical properties of a clayey coastal plain soil as affected by tillage. *J. Soil Water Conserv.*, 49:276-283, 1994.

IMHOFF, S.; KAY, B.D.; SILVA, A.P.; HAJABBASI, M.A. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil Till. Res.*, 106:303-310, 2010.

- KAY, B.D., HAJABBASI, M.A., YING, J., TOLLENAAR, M. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil Till. Res.* 88:42–54, 2006.
- KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:221-227, 2007.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116:107-136, 2003.
- LIPIEC, J.; HORN, R.; PIETRUSIEWICZ, J.; SICZEK, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil Till. Res.*, 121:74–81, 2012.
- LYNCH, J. Root Architecture and Plant Productivity. *Plant Physiol*, 109:7-13, 1995.
- MASLE, J.; FARQUHAR, G.D.; GIFFORD, R.M. Growth and carbon economy of wheat seedlings as affected by soil resistance to penetration and ambient partial pressure of carbon dioxide. *Aust. J. Plant Physiol.* 17, 465–487. 1990.
- MATERECHERA, S.A.; MLOZA-BANDA, H.R. Soil penetration resistance, root growth and yield of maize as influenced by tillage system on ridges in Malawi. *Soil Till. Res.* 41:13-24, 1997.
- NUNES, R.S.; SOUSA, D.M.G.; GOEDERT, W.J.; VIVALDI, L.J. Distribuição de fósforo no solo em razão do sistema de cultivo e manejo da adubação fosfatada. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:877-888, 2011.
- OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil Till. Res.* 117:201-210, 2011.
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.*, 46:203-208, 1998.
- PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V.; SERRAT, B.M.; FAVARETTO, N.; ANJOS, A. Atributos químicos de um Latossolo Bruno sob sistema plantio direto em função da estratégia de adubação e do método de amostragem de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:581-590, 2009.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Till. Res.*, 102:242–254, 2009.
- SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian Oxisol under different tillage systems. *Soil Till. Res.*, 44:23-34, 1997.
- SHIPITALO, M. J.; PROTZ, R. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. *Can. J. Soil Sci.*, 67:445-456, 1987.

SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Sci. Agric.*, 61:4-451-456, 2004.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 1775-1781, 1994.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. *Soil Till. Res.*, 19:111-119, 1991.

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Till. Res.*, 52:223-232, 1999.

van LIER, Q.J. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:233-238, 2001.

VEIGA, M.; HORN, R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil Till. Res.*, 92:104-113, 2007.

ZONTA, E.; BRASIL, F.C.; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. O sistema radicular e suas interações com o ambiente. In: FERNANDES, M.S. *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2006. p.7-52.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final desta dissertação cabe a pergunta: a agricultura praticada na região de estudo (Planalto Rio-Grandense) é conservacionista? Considerando que agricultura conservacionista é a agricultura conduzida sob a proteção de um complexo de tecnologias de caráter sistêmico, objetivando preservar, manter e recuperar os recursos naturais, mediante o manejo integrado do solo, da água e da biodiversidade, devidamente compatibilizados com o uso de insumos externos; e que compreende um conjunto de práticas agrícolas ou de preceitos que minimiza alterações na estrutura, composição e biodiversidade do solo, a resposta é provavelmente não.

Percebe-se nos estudos desenvolvidos nesta dissertação que: a degradação da estrutura do solo em áreas sob plantio direto, na região de estudo, compromete o crescimento das plantas; nestas áreas a concentração de fertilizantes oriundos de fontes externas ao do sistema, na camada superficial do solo, é maior que a necessária para o pleno desenvolvimento das plantas, os quais ficam propensos ao arraste pela água de enxurrada ou lixiviação para corpos d'água; e as práticas mecânicas utilizadas como alternativas para aliviar a degradação estrutural do solo nestas áreas, além de promoverem apenas efeitos efêmeros, aumentam o consumo de combustíveis fósseis e a taxa de emissão de gases de efeito estufa. Entende-se, portanto, que a agricultura praticada nestes moldes não garante a manutenção dos recursos naturais, sobretudo do solo, como preconiza a agricultura conservacionista.

Sabendo, entretanto, que: a economia brasileira depende da produtividade do sistema agrícola, atualmente limitada pela degradação física do solo sob plantio direto, a ação mecânica, por si só, não soluciona este problema e contrapõem-se aos preceitos da agricultura conservacionista, a atividade biológica isolada também não será eficiente na restauração estrutural do solo, pois o desenvolvimento radicular é limitado na camada degradada, cabe outra pergunta: como contornar o problema da degradação estrutural do solo possibilitando a sustentabilidade do sistema agrícola produtivo nesta região?

O primeiro passo a ser dado é eleger um complexo mínimo de técnicas exigidas para induzir conservacionismo ao sistema agrícola produtivo. A agricultura conservacionista, portanto, seria plenamente implementada garantindo preservação, manutenção e restauração dos elementos naturais, como o solo. Isto não ocorre com a simples adoção dos preceitos do plantio direto.

A restituição da estrutura do solo em áreas sob plantio direto, somente será possível se os fatores que concorrem para a sua degradação forem suprimidos. Esta percepção aflora da

dificuldade de promover melhorias efetivas na estrutura do solo, uma vez que métodos mecânicos podem aliviar, mas não solucionar efetivamente o problema. Dada à dificuldade de resolvê-lo, é primordial evitar o problema. Os fatores que promovem a degradação do solo nestas áreas, entretanto, ainda não estão plenamente esclarecidos, assim, não podem ser diretamente atacados. Estudos neste sentido, portanto, ainda são necessários e de fundamental importância na busca da sustentabilidade do sistema agrícola produtivo.

Entre as alternativas estudadas, a semeadora com hastes sulcadora de ação profunda (0,17 m) mostra-se uma ferramenta com potencial para mitigar a degradação estrutural do solo sob plantio direto, no entanto isto poderá levar muitos anos. É importante destacar que: a utilização da semeadora com haste sulcadora de ação profunda não contrapõe os preceitos preconizados pelo sistema plantio direto, pois mobiliza o solo apenas na linha de semeadura, mantém os restos culturais na superfície do solo, possibilita melhor desenvolvimento às plantas, uma vez que tem ação mecânica sobre a camada degradada; possibilita a diminuição da concentração de fertilizantes na superfície do solo, uma vez que os deposita em maior profundidade, diminuindo os riscos de serem arrastados pela água de enxurrada; e introduz, simultaneamente a mobilização do solo, sementes, diminuindo o tempo entre a mobilização na linha de semeadura e o desenvolvimento vegetal. Assim poderá retardar a reconsolidação do solo mobilizado.

No entanto, esta ferramenta somente se constituirá em uma ferramenta capaz de contribuir para a sustentabilidade do sistema agrícola produtivo se for adotada juntamente com todo complexo de preceitos preconizados pela agricultura conservacionista. O modelo de produção, sobretudo, deve consistir na diversificação de espécies via rotação, sucessão e/ou consorciação de culturas, para assim, proporcionar cobertura permanente da superfície do solo e garantir o aporte de material orgânico ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatível com a demanda biológica do solo. Desta forma, ter-se-ia: a ação mecânica imediata da haste sulcadora, diminuindo as restrições físicas impostas pela camada degradada; a ação biológica, devido ao desenvolvimento radicular favorecido; e ação química, pois haveria a diminuição da estratificação vertical dos atributos químicos do solo.

É de fundamental importância considerar também, que, os estudos no sentido de avaliar os efeitos da utilização deste tipo de semeadora ainda são proeminentes. Ainda são necessários estudos no sentido de avaliar o efeito desta técnica sobre a produtividade de diferentes culturas; avaliar a demanda de potência por linha da semeadora; estudar mais o comportamento da água no solo mobilizado pelas hastes sulcadoras.

9. APÊNDICES

Apêndice 1

Caracterização pedológica do perfil modal do solo próximo a área experimental.

CLASSIFICAÇÃO: NITOSSOLO VERMELHO Distrófico latossólico

LOCALIZAÇÃO: 28° 11'07" S, 52° 19'56" S (WGS-84)

ALTITUDE: 702 m

SITUAÇÃO, DECLIVIDADE E COBERTURA VEGETAL: barranco de estrada em terço superior de encosta com 5% de declividade, sob cobertura de gramíneas.

LITOLOGIA: Formação Serra Geral - efusivas básicas

PEDREGOSIDADE: Ausente

ROCHOSIDADE: Ausente

RELEVO LOCAL: Suave ondulado

RELEVO REGIONAL: Suave ondulado

EROSÃO: Ausente

DRENAGEM: Boa

Tabela 1 A – Descrição morfológica do perfil modal do solo.

A1	0 – 17 cm; vermelha (5YR 3/4, úmida); vermelha (5YR 3,5/4, seca); argilosa; moderada pequena/média e grande blocos subangulares; friável, ligeiramente pegajosa a pegajosa e plástica; transição plana e gradual; raízes abundantes.
A2	17 – 35 cm; vermelha (2,5YR 3/4, úmida); vermelha (2,5YR 3,5/4, seca); argilosa; moderada pequena/média e grande blocos subangulares; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual; raízes comum.
AB1	35 – 52 cm; vermelha (2,5YR 3/4, úmida); vermelha (2,5YR 3,5/4, seca); argilosa; moderada pequena/média blocos subangulares; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual; raízes poucas.
AB2	52 – 73 cm; vermelha (2,5YR 3/4, úmida); vermelha (2,5YR 3,5/6, seca); argilosa; moderada pequena/média blocos subangulares; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual.
BA	73 – 92 cm; vermelha (2,5YR 3/4, úmida); vermelha (2,5YR 3,5/6, seca); argilosa; moderada pequena/média blocos subangulares; cerosidade fraca e comum; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual.
B1	92 – 166 cm; vermelha (2,5YR 3/4, úmida); vermelha (2,5YR 3,5/6, seca); argilosa; moderada média e grande blocos subangulares; cerosidade moderada e comum; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual.
B2	166 – 266 cm; vermelha (2,5YR 3/6, úmida); vermelha (2,5YR 3,5/6, seca); argilosa; moderada média e grande blocos subangulares; cerosidade moderada e abundante; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual.
B3	266 – 286+ cm; vermelha (2,5YR 3/6, úmida); vermelha (2,5YR 4/6, seca); argilosa; moderada média e grande blocos subangulares; friável a firme, pegajosa e plástica; transição plana e gradual.

Tabela 2 A - Atributos físicos do solo no perfil modal.

Horizontes		Granulometria, g kg ⁻¹			GD	GF	Silte
Símbolo	Prof., cm	Areia	Silte	Argila	----- % -----	-----	Argila
A1	0-17	254,0	176,6	571,7	52,72	47,28	748,3
A2	17-35	247,4	190,3	569,8	45,02	54,98	796,7
AB1	35-52	205,0	136,6	660,1	33,71	66,29	760,2
AB2	52-73	152,1	103,2	744,4	5,33	94,67	847,5
BA	73-92	116,0	107,9	780,5	3,56	96,44	888,4
B1	92-166	146,2	98,7	762,3	3,58	96,42	861,0
B2	166-266	150,1	71,2	768,8	3,21	96,79	840,0
B3	266-286+	177,5	85,4	737,5	3,46	96,54	822,9

Tabela 3 A - Atributos químicos do solo no perfil modal.

Horizontes	Cálcio	Magnésio	Potássio	Sódio	SB	Alumínio	H ⁺	H+Al	CTC _{pH7}
	----- cmol _c kg ⁻¹ -----								
A1	4,63	2,98	0,35	0,035	7,99	0,32	7,86	8,18	16,17
A2	2,02	1,23	0,13	0,027	3,39	2,69	10,77	13,46	16,86
AB1	1,73	1,14	0,18	0,033	3,08	2,88	10,56	13,35	16,44
AB2	1,47	0,78	0,11	0,021	2,39	3,19	8,89	12,08	14,47
BA	0,95	0,54	0,10	0,023	1,62	3,46	8,17	11,63	13,26
B1	0,58	0,28	0,10	0,027	0,99	2,47	7,74	10,21	11,20
B2	0,28	0,20	0,11	0,023	0,63	2,20	7,37	9,58	10,20
B3	0,17	0,12	0,08	0,015	0,39	2,23	7,97	10,17	10,56

Tabela 4 A - Atributos químicos do solo no perfil modal.

Horizontes	pH	CO	T Argila	V	m	Óxidos (g kg ⁻¹)			Ki	Kr
	H ₂ O	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹	----- % -----	-----	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		
A1	20,9	20,9	28,3	49,4	3,8	185	135	191	1,65	1,14
A2	13,5	13,5	29,6	20,1	44,3	188	134	187	1,67	1,20
AB1	12,1	12,1	24,9	18,8	47,5	207	128	211	1,71	1,17
AB2	8,3	8,3	19,4	16,5	57,2	203	133	232	1,49	1,09
BA	5,7	5,7	16,9	12,3	68,1	209	129	230	1,55	1,14
B1	3,5	3,5	14,7	8,9	71,3	229	141	244	1,60	1,17
B2	1,3	1,3	13,3	6,1	77,8	252	150	259	1,66	1,21
B3	0,4	0,4	14,3	3,7	85,0	191	139	232	1,65	1,14

Apêndice 2

Gráficos da distribuição de frequências para as variáveis de morfologia radicular (densidade, comprimento e volume de raiz) utilizados no estudo 4, considerando a análise conjunta dos dados das camadas 0,0-0,07 m e 0,07-0,17 m.

