**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Qualidade física da cama de semeadura do solo em sistemas de manejo

Osvaldo Guedes Filho

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de Concentração: Solos e Nutrição
de Plantas.

**Piracicaba
2012**

Oswaldo Guedes Filho
Engenheiro Agrônomo

Qualidade física da cama de semeadura do solo em sistemas de manejo

Orientador:
Prof. Dr. **ALVARO PIRES DA SILVA**

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Ciências. Área de Concentração:
Solos e Nutrição de Plantas.

**Piracicaba
2012**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Guedes Filho, Osvaldo

Qualidade física da cama de semeadura do solo em sistemas de manejo / Osvaldo
Guedes Filho.- - Piracicaba, 2012.
155 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Balanço hídrico 2. Condutividade hidráulica do solo 3. Física do solo 4. Manejo do solo 5. Plantio direto 6. Semeadura 7. Resistência dos solos I. Título

CDD 631.43
G924q

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICO

Ao meu sobrinho **Diego Guedes Chaves** (*in memoriam*),
seu sorriso estará para sempre em nossa memória.

OFEREÇO

À minha mãe **Edilza** e **minhas irmãs** por sempre me
apoiarem e acreditarem em minhas escolhas.

À minha noiva **Renata** pela presença, incentivo e
compreensão em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade e contribuição em minha formação;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de doutorado no Brasil e no exterior;

Ao meu orientador Prof. Dr. Alvaro Pires da Silva, pela oportunidade, orientação e ensinamentos nesta etapa;

À Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola, pelas contribuições, suporte, correções e sugestões ao longo da condução deste projeto;

À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pela concessão da área de estudo;

Ao Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena, pela ajuda, incentivo, correções e sugestões ao longo da condução deste projeto;

À Kansas State University e ao Prof. Dr. Humberto Blanco-Canqui por todo suporte, orientação, ensinamentos e acolhida durante o doutorado sanduíche;

Ao técnico Jair Ferrer pelo suporte em campo e em laboratório sempre que necessário;

Aos colegas Marina e Sérgio pela ajuda em campo na primeira etapa do projeto;

Aos amigos de jornada da pós-graduação: Sâmala, Sueli, Edison, Getúlio, Lorena, Marina e Sérgio, pela amizade, ajuda mútua e momentos de descontração;

A todos os colegas da pós-graduação pela amizade e bom convívio;

A todos os Professores e Funcionários do Departamento de Ciência do Solo, pela contribuição ao longo deste trabalho;

À minha noiva Renata pelo companheirismo, lealdade, carinho e toda a ajuda ao longo do desenvolvimento desta;

À minha mãe e toda minha família pelo apoio e incentivo, e por entender que toda essa ausência faz parte de um objetivo maior;

A Deus, que nos dá força espiritual para sempre seguir em frente.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 DESENVOLVIMENTO.....	17
2.1 Revisão Bibliográfica.....	17
2.2 Material e Métodos.....	36
2.2.1 Experimento escarificação mecânica e biológica – Brasil.....	36
2.2.1.1 Descrição da área experimental.....	36
2.2.1.2 Medições de campo.....	37
2.2.1.2.1 Parâmetros de emergência das culturas.....	37
2.2.1.2.2 Resistência à penetração e conteúdo de água no solo.....	38
2.2.1.2.2.1 Cultura do milho.....	38
2.2.1.2.2.2 Cultura da soja.....	38
2.2.1.3 Precipitação pluviométrica.....	38
2.2.1.4 Amostragens de solo.....	39
2.2.1.5 Determinação das propriedades do solo.....	40
2.2.1.5.1 Resistência tênsil dos agregados e friabilidade do solo.....	40
2.2.1.5.2 Estabilidade de agregados do solo pelo método da percolação.....	41
2.2.1.5.3 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	42
2.2.1.5.4 Permeabilidade ao ar, índices de continuidade de poros e porosidade bloqueada....	43
2.2.1.5.5 Densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total e de aeração.....	45
2.2.1.5.6 Distribuição de partículas do solo.....	45
2.2.1.5.7 Carbono orgânico do solo.....	46
2.2.1.5.8 Intervalo hídrico ótimo do solo.....	46
2.2.2 Experimentos Sistemas de Preparo e Sistemas de Cultivo do solo – EUA.....	48
2.2.2.1 Descrição da área experimental.....	48
2.2.2.2 Precipitação pluviométrica.....	49
2.2.2.3 Medições de campo.....	50
2.2.2.3.1 Parâmetros de emergência da cultura do trigo.....	50
2.2.2.3.2 Resistência à penetração e conteúdo de água no solo.....	50
2.2.2.4 Amostragens de solo.....	51

2.2.2.5 Intervalo hídrico ótimo do solo.....	51
2.2.3 Análises estatísticas.....	51
2.3 Resultados e Discussão.....	53
2.3.1 Experimento Escarificação mecânica e biológica do solo.....	53
2.3.1.1 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do milho – 2009.....	53
2.3.1.2 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura da soja – 2010.....	56
2.3.1.3 Resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo.....	59
2.3.1.4 Estabilidade de agregados pela percolação de água e carbono orgânico do solo.....	64
2.3.1.5 Condutividade hidráulica do solo saturado.....	68
2.3.1.6 Permeabilidade ao ar.....	71
2.3.1.7 Índices de continuidade de poros.....	73
2.3.1.7.1 Índice <i>K_I</i>	73
2.3.1.7.2 Índice <i>N</i>	76
2.3.1.8 Intervalo hídrico ótimo do solo.....	81
2.3.2 Experimento Sistemas de Preparo – EUA.....	95
2.3.2.1 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do trigo – 2011.....	95
2.3.2.1 Intervalo hídrico ótimo do solo.....	97
2.3.3 Experimento Sistemas de Cultivo – EUA.....	105
2.3.3.1 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do trigo – 2011.....	105
2.3.3.2 Intervalo hídrico ótimo do solo.....	107
2.3.4 Relações entre os parâmetros de emergência das culturas e as propriedades do solo.....	118
2.3.4.1 Cama de semeadura da cultura do milho – 2009.....	118
2.3.4.2 Cama de semeadura da cultura da soja – 2010.....	123
2.3.4.3 Cama de semeadura da cultura do trigo – 2011- Experimento sistemas de preparo....	127
2.3.4.4 Cama de semeadura da cultura do trigo – 2011- Experimento sistemas de cultivo....	129
3 CONCLUSÕES.....	131
3.1 Experimento escarificação mecânica e biológica – Brasil	131
3.2 Experimentos sistemas de preparo e sistemas de cultivo do solo – EUA.....	132
REFERÊNCIAS.....	135

RESUMO

Qualidade física da cama de semeadura do solo em sistemas de manejo

A cama de semeadura é uma das principais condições físicas do solo para crescimento das plantas. A avaliação da qualidade física desse ambiente do solo, onde ocorre a germinação e emergência das culturas, é de fundamental importância para compreender os fatores que afetam o seu desenvolvimento. A presente pesquisa foi realizada, inicialmente, no Brasil, com o objetivo de avaliar a qualidade física da cama de semeadura do solo, pela determinação de propriedades estruturais e físico-hídricas do solo, e parâmetros de emergência das culturas milho e soja em sistema plantio direto de longa duração submetido à escarificação mecânica e biológica do solo. O trabalho foi desenvolvido em área pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa, Paraná. Os tratamentos avaliados foram: sistema plantio direto por 16 anos, sistema plantio direto submetido à escarificação mecânica até 0,25 m de profundidade e sistema plantio direto submetido à escarificação biológica por meio do nabo forrageiro. As amostragens de solos foram realizadas aos seis e 18 meses após a implantação dos tratamentos, correspondentes às semeaduras das culturas do milho (Outubro de 2009) e da soja (Novembro de 2010) nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade. Para o experimento desenvolvido nos Estados Unidos, o objetivo foi avaliar a qualidade física da cama de semeadura do solo, pela determinação do intervalo hídrico ótimo, e parâmetros de emergência da cultura do trigo, em dois experimentos de longa duração que envolveu sistemas de cultivo e sistemas de preparo do solo. Esses experimentos foram conduzidos em área da Kansas State University, em Hays, Kansas, EUA. Os sistemas de preparo do solo envolveram a rotação trigo/sorgo/pousio sob o preparo convencional, reduzido e plantio direto implantados há 46 anos. Os sistemas de cultivo consistiram das sucessões trigo/pousio, trigo/sorgo/pousio e trigo/trigo manejadas sob preparo reduzido e plantio direto, implantados há 35 anos. A amostragem do solo foi realizada na cama de semeadura do trigo (Outubro/Novembro de 2011) nas camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Tukey. Os resultados do estudo feito no Brasil demonstraram que a escarificação mecânica apresentou um baixo efeito residual sobre as propriedades físicas do solo, indicando ser desnecessária sua aplicação com vistas a melhorar a qualidade física do solo. A cultura do nabo forrageiro, como alternativa de escarificação biológica, pode ser incluída no sistema de rotação de culturas, uma vez que se mostrou eficiente em melhorar algumas propriedades físicas do solo. No estudo realizado nos EUA, no experimento sobre sistemas de preparo, o preparo reduzido resultou em melhor condição física da cama de semeadura do solo. O preparo convencional foi o tratamento que apresentou uma condição física do solo menos favorável ao crescimento inicial das plantas. O sistema de cultivo trigo/trigo sob preparo reduzido apresentou o melhor IHO da cama de semeadura. O procedimento *boundary line* demonstrou que os parâmetros de emergência das culturas foram dependentes das propriedades físicas da cama de semeadura do solo.

Palavras-chave: Intervalo hídrico ótimo; Resistência tênsil; Estabilidade de agregados; Permeabilidade ao ar; Condutividade hidráulica; Emergência das culturas

ABSTRACT

Physical quality of the soil seedbed under management systems

The seedbed is one of the most important soil physical conditions for plant growth. The evaluation of the soil physical quality in such soil environment is essential to understand the factors that affect crop development, as it is where seed germination and plant emergence and establishment take place. The objective of the experiment carried out in Brazil was to evaluate: the physical quality of the soil seedbed by the determination of its structural and physical-hydric properties; and the emergence parameters of the corn and soybean crops under long-term no tillage submitted to mechanical and biological chiseling. This experiment was carried out in Ponta Grossa, Paraná State, Brazil, at the farm-school belonging to Ponta Grossa State University. The treatments were no-tillage for 16 years, no-tillage submitted to mechanical chiseling at 0.25 m soil depth and no-tillage submitted to biological chiseling by a forage radish crop. Soil samples were collected at six and 18 months after the treatments were implemented, corresponding to a maize seedbed (October 2009) and a soybean seedbed (November 2010), for the 0 to 5 and 5 to 10 cm soil depths. For the experiments developed in the United States, the objective was to evaluate: the physical quality of the soil seedbed by the least limiting water range determination; and the wheat emergence parameters from two long-term experiments involving different cropping systems (35 years) and soil tillage systems (46 years). These experiments were conducted in an area belonging to Kansas State University located in Hays, Kansas, USA. The tillage systems experiment consisted of a wheat/sorghum/fallow rotation under conventional, reduced and no tillage. The cropping systems experiment consisted of wheat/fallow, wheat/sorghum/fallow and wheat/wheat rotations cultivated under reduced and no tillage. Soil samples were collected from the wheat seedbed (October/November 2011) at the 0 to 5 and 5 to 10 cm soil depths. The data were submitted to the variance analysis and, when significant, the means were compared by the Tukey test. The results from the experiment performed in Brazil showed that the mechanical chiseling had a lower residual effect on the soil physical properties, indicating that it is unnecessary when the aim is to improve the soil physical quality. The forage radish cultivation, as an alternative of biological chiseling, can be included in the crop rotation system once it was efficient at improving some soil physical properties. For the tillage systems experiment, which was conducted in the United States, the reduced tillage treatment resulted in a better physical condition of the soil seedbed. The conventional tillage was the treatment that presented the least favorable soil physical condition for the initial plant growth. The wheat/wheat cropping system under reduced tillage showed the best least limiting water range of the soil seedbed. The boundary line approach demonstrated that the crop emergence parameters were dependent on the physical properties of the soil seedbed.

Keywords: Least limiting water range; Tensile strength; Aggregate stability; Air permeability; Hydraulic conductivity; Crop emergence

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas aumentaram os esforços para avaliar e quantificar a qualidade do solo e ações para sua melhoria, uma vez que a informação sobre a qualidade do solo pode levar ao uso mais sustentável desse recurso natural em relação à produção de alimentos e fibras para a crescente população mundial. Dentre todos os aspectos relacionados à qualidade do solo, um dos mais importantes é a sua qualidade física, já que a planta necessita de uma adequada estrutura para o seu desenvolvimento. Assim, a qualidade física do solo está diretamente relacionada com a sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola.

Embora o termo qualidade física do solo seja um tema relativamente recente, a avaliação da condição física do solo para o crescimento das plantas data de longo tempo. Nesse sentido, as propriedades e indicadores de qualidade física do solo têm sido determinados no intuito de melhor interpretar e entender como a condição física do solo resultante dos diferentes sistemas de manejo influencia o crescimento das plantas. No entanto, ao longo do ciclo da cultura o solo muda sua condição física, seja pelo próprio desenvolvimento da planta assim como pelos ciclos de umedecimento e secamento, e também por fatores relacionados ao seu manejo, como o tráfego de máquinas, dentre outros fatores. Dessa forma as diferentes condições físicas que o solo pode apresentar ao longo do ciclo de uma cultura pode influenciá-la em diferentes caminhos e magnitudes, sendo o seu estudo importante para entender como e quanto essas diferenças afetam o desenvolvimento das culturas.

Uma das principais condições do solo ao crescimento de plantas se refere à cama de semeadura, pois a sua formação é de fundamental importância para a germinação, emergência e estabelecimento das culturas. A cama de semeadura representa o ambiente físico do solo criado imediatamente após a semeadura da cultura e sua influência pode variar grandemente em termos de agregação e porosidade do solo. Em sistemas que envolvem a mobilização do solo, a cama de semeadura é resultante diretamente das operações de preparo do solo. Para os sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema plantio direto, a cama de semeadura é originada unicamente pela operação de semeadura que promove a abertura de sulco no solo para deposição da semente e do adubo. O arranjo do solo, proveniente da formação da cama de semeadura, tem impactos diretos na sua temperatura, conteúdo de água, disponibilidade de oxigênio e resistência a penetração, todos com potencial para afetar o desempenho da cama de semeadura bem como sua habilidade em prover um ambiente adequado para emergência da cultura.

Pouco se conhece sobre as mudanças que ocorrem na condição física da cama de semeadura em sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema plantio direto, o qual é considerado o mais importante sistema de manejo do solo para a produção de grãos da agricultura moderna, sendo cultivado em uma área de aproximadamente 117 milhões de hectares no mundo. No Brasil a área cultivada em sistema plantio direto corresponde a mais da metade da área cultivada com grãos, com cerca de 26 milhões de hectares. A tendência é que essa área continue a aumentar, tendo em vista as melhorias no potencial produtivo do solo advindos deste sistema de manejo. Todavia, em sistema plantio direto tem sido comumente relatado o desenvolvimento de uma camada superficial compactada com o decorrer do tempo de adoção do sistema, proveniente do intenso tráfego de máquinas e do não revolvimento do solo.

A ocorrência da compactação do solo é considerada um fator adverso para o desenvolvimento da planta, uma vez que pode afetar a germinação das sementes, emergência das plântulas e o crescimento radicular. Devido a isso, têm sido utilizadas algumas alternativas com vistas a atenuar a compactação do solo em sistema plantio direto, tais como a escarificação mecânica e a biológica do solo. Enquanto a primeira utiliza implementos mecânicos conhecidos como escarificadores, a segunda se baseia no cultivo de plantas com um sistema radicular profundo e agressivo que funcionam como descompactadores biológicos do solo. O objetivo de ambas as práticas é o mesmo: reduzir a compactação do solo por meio da redução na densidade e resistência à penetração, aumento do espaço poroso, aumento da retenção e da disponibilidade de água às plantas.

Os estudos dos métodos de descompactação do solo, com e sem mobilização do solo são escassos, principalmente em relação à utilização de plantas como descompactadoras biológicas do solo. Dessa forma, para o experimento desenvolvido no Brasil, a hipótese do trabalho foi a de que a escarificação mecânica e biológica do solo em sistema plantio direto resultaria em melhoria da qualidade física da cama de semeadura do solo para crescimento das plantas. Neste contexto, o objetivo geral do trabalho foi avaliar a qualidade física da cama de semeadura do solo, por meio da determinação de propriedades estruturais e das relacionadas ao movimento de água e ar do solo, e parâmetros de emergência das culturas milho e soja em sistema plantio direto de longa duração submetido à escarificação mecânica e biológica do solo. Os objetivos específicos foram: i) avaliar os parâmetros de emergência das culturas, a resistência do solo à penetração e o conteúdo de água no solo no campo; ii) determinar as propriedades relacionadas à condição estrutural do solo: resistência tênsil, friabilidade, estabilidade de agregados e densidade do solo; iii) determinar as propriedades

dinâmicas relacionadas ao fluxo de ar e água no solo: condutividade hidráulica do solo saturado e permeabilidade do solo ao ar; iv) determinar o indicador da qualidade estrutural do solo o intervalo hídrico ótimo; v) correlacionar os parâmetros de emergência das culturas com as propriedades físicas do solo avaliadas por meio da técnica *Boundary line*.

A qualidade física da cama de semeadura do solo também foi avaliada em dois experimentos na região central dos Estados Unidos, a qual é conhecida como uma das mais importantes regiões produtoras de grãos na América do Norte. Todavia, essa região pertence a um frágil ecossistema caracterizado pela limitação hídrica (baixa precipitação pluvial), baixo teor de matéria orgânica e altas taxas de erosão do solo. Nesta região, o sistema de cultivo trigo/pousio foi dominante por muitos anos, pois se acreditava que na fase pousio ocorria aumento do armazenamento de água no solo e redução do potencial erosivo do solo. Com o avanço dos sistemas de manejo que propiciam maior retenção de resíduos na superfície do solo, começou-se a perceber que a intensificação dos sistemas de cultivo aliado aos sistemas de manejo conservacionistas do solo poderia promover uma melhor retenção de água e decréscimo da evaporação que a fase pousio. Isso, conseqüentemente, resultaria em uma melhor condição física do solo para desenvolvimento das culturas. Todavia, existe ainda necessidade de mais informações, principalmente, utilizando indicadores da qualidade física do solo para evidenciar quais seriam os melhores sistemas de cultivo e manejo do solo em regiões semi-áridas como esta.

Levando-se em conta as informações acima, o objetivo geral do trabalho foi avaliar a qualidade física da cama de semeadura do solo, por meio da determinação do intervalo hídrico ótimo, e parâmetros de emergência da cultura do trigo em dois experimentos de longa duração envolvendo sistemas de cultivo (35 anos) e sistemas de preparo do solo (46 anos). A hipótese do trabalho foi a de que sistemas de cultivo contínuos sob sistema plantio direto ofereceriam uma melhor qualidade física para a cama de semeadura do solo avaliada pelo intervalo hídrico ótimo. Os objetivos específicos foram: i) avaliar os parâmetros de emergência da cultura do trigo, a resistência do solo à penetração e o conteúdo de água no solo no campo; ii) determinar o intervalo hídrico ótimo para os sistemas de cultivo e preparo do solo; iii) correlacionar os parâmetros de emergência de trigo com as propriedades físicas do solo medidas através da técnica *boundary line*.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

A cama de semeadura é uma das principais condições do solo para o crescimento de plantas pois a sua formação e/ou preparo é crucial para o desenvolvimento das culturas e, consequentemente, da produtividade. A cama de semeadura é a camada do solo na qual ocorrem processos ligados à germinação, emergência e estabelecimento das culturas (ATKINSON et al., 2007). A qualidade da cama de semeadura é afetada por uma variedade de fatores químicos, físicos e biológicos que estão diretos ou indiretamente relacionados com as práticas de manejo (HAKANSSON et al., 2002; LIPIEC; HATANO, 2003). Assim, ela é considerada a camada de maior importância agrônômica para a produção de grãos, pois nela são fornecidos os principais elementos que determinam o crescimento das plantas: a água, o ar, os nutrientes, o suporte mecânico para as raízes e o calor para desencadear as reações químicas e biológicas (ATKINSON et al., 2009; TAPELA; COLVIN, 2002; NASR; SELLES, 1995).

A cama de semeadura é geralmente considerada como a camada de solo a qual tem sido preparada para uma condição tal, que promova a germinação de sementes e a emergência das plântulas (BRAUNACK; DEXTER; 1989). Para Hakansson et al. (2002) a cama de semeadura é definida como uma camada superficial solta e rasa originada diretamente das operações de preparo do solo e da abertura do sulco para a semeadura das culturas. Braunack e Dexter (1989) relatam que o preparo do solo é realizado para modificar as suas condições de forma a melhorar o desenvolvimento da cultura. Sendo o adequado ambiente para estabelecimento das culturas desenvolvido diretamente das técnicas de preparo do solo da cama de semeadura do solo (ARVIDSSON et al., 2000; HAKANSSON et al., 2002; ATKINSON et al., 2009), as quais influenciarão as condições físicas do solo resultantes (LARNEY et al., 1988). Dessa forma, como resultado do preparo da cama de semeadura, a semente deve ser colocada em uma profundidade desejada, de modo a propiciar a rápida emergência das plântulas; o solo deve apresentar quantidades suficientes de água, temperatura e aeração adequadas para germinação e emergência; e, a cama de semeadura deve também funcionar como uma barreira evaporativa (ATKINSON et al., 2009).

Nos sistemas que incluem algum tipo de preparo é mais fácil observar as modificações da condição física do solo. Por outro lado, pouco se conhece sobre as mudanças que ocorrem na condição física do solo na cama de semeadura em sistemas de manejo conservacionistas, como o sistema plantio direto (SPD), já que nesse sistema a cama de semeadura é resultante

apenas da abertura do sulco pelos mecanismos rompedores das semeadoras. Nos solos cultivados sob sistema plantio direto, a cama de semeadura resulta da mobilização do solo unicamente na linha de plantio pela operação de semeadura que consiste em cortar o solo para deposição da semente e do adubo, em face da ausência de revolvimento integral do solo. Desta forma, a cama de semeadura é fortemente influenciada pela atividade biológica dos diferentes sistemas radiculares propiciados pela rotação de culturas bem como dos efeitos à estrutura ligados aos ciclos de secagem e umedecimento do solo. Alguns autores relatam que em plantio direto contínuo a compactação natural ocorrida na camada superficial devido à ausência de preparo pode afetar a emergência e produtividade das culturas (FINLAY et al., 1994; BOTTA et al., 2009). Neste sistema de produção, que a cada ano se expande exponencialmente em países de clima tropical e subtropical (FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRABAP, 2012), existem poucos estudos sobre a qualidade física da cama de semeadura. Assim, torna-se fundamental avaliar a condição física do solo da cama de semeadura para melhor entender o ambiente físico no qual germinação e emergência acontecem. Porém, o período que compreende a cama de semeadura vai até os 14 -15 dias após a semeadura (BRAUNACK; DEXTER, 1989), e devido a esse curto período pouca ênfase tem sido dada no estudo das condições estruturais do solo, as quais são responsáveis pela emergência e estabelecimento da cultura.

A influência da cama de semeadura pode apresentar ampla variação, principalmente em termos de agregação e porosidade do solo. O arranjo do solo tem impactos diretos na temperatura, conteúdo de água, disponibilidade de oxigênio e resistência à penetração do solo (ATKINSON et al., 2007), todos com potencial para afetar o desempenho da cama de semeadura bem como sua habilidade em prover um ambiente adequado para estabelecimento de culturas (ATKINSON et al., 2009). Por outro lado, o manejo praticado pode também afetar as propriedades físicas do solo, alterando a dinâmica do ar, da água e de solutos no solo. As propriedades físicas do solo por sua vez afetam o desenvolvimento das culturas e sendo influenciadas pelo cultivo variam grandemente dependendo da sua intensidade (ATKINSON et al., 2009). As propriedades físicas do solo são as principais determinantes da emergência e estabelecimento das plântulas. Nessa fase os nutrientes são de importância secundária uma vez que as plântulas ainda utilizam as reservas da semente (NASR; SELLES, 1995).

A relação solo-planta é muito complexa e alguns estudos têm demonstrado a importância das propriedades físicas do solo para o desempenho da cama de semeadura. Muitos trabalhos, principalmente, em regiões de clima temperado, avaliaram as condições da cama de semeadura em sistema de preparo convencional (COMIA et al., 1994; ARVIDSSON

et al., 2000; ATKINSON et al., 2007). O preparo do solo tem muitas propostas, incluindo primariamente a criação de uma adequada cama de semeadura para crescimento das plantas (ATKINSON et al., 2009). Para cama de semeadura, o preparo muitas vezes pulveriza o solo permitindo o crescimento radicular e a fácil passagem de ar e água. Os benefícios do preparo são bem conhecidos, todavia a quantidade necessária para conseguir condições ótimas no solo, não (TAPELA; COLVIN, 2002). A condição do solo resultante do preparo depende dos tipos de implementos usados e da condição do solo, umidade e estrutura, quando o preparo ocorreu. Embora algum preparo seja necessário, o preparo excessivo pode deixar o solo vulnerável à erosão hídrica e eólica, e com efeitos deletérios na emergência das culturas e atividade biológica do solo (COMIA et al., 1994; TAPELA; COLVIN, 2002; CZYZ, 2004).

O rápido e uniforme estabelecimento da cultura é considerado pré-requisito para a produção agrícola eficiente e com mínimo impacto ambiental, uma vez que a desuniformidade na emergência ocasiona perdas de nutrientes por lixiviação, aumento da incidência de plantas daninhas e aumento no consumo de herbicidas (HAKANSSON et al., 2002). Dessa forma, o sucesso do estabelecimento da cultura é considerado uma importante fase do processo de produção agrícola e é adversamente afetado pela pobre emergência (AWADHWAL; THIERSTEIN, 1985). Masle e Passioura (1987) em experimento de laboratório mostraram que em valores de resistência à penetração maiores que 3 MPa abaixo da semente, acarretaram em decréscimo de 10% na emergência de trigo comparado com sementes crescendo em solo com resistência à penetração menor que 1,0 MPa. Em trabalho posterior, Passioura (2002) atribuiu isso ao fato de que as raízes detectam a dureza do solo e emitem sinais à parte aérea da planta, limitando assim seu desenvolvimento. Esse impedimento mecânico experimentado pelas raízes e o conseqüente decréscimo na sua taxa de crescimento ocorrem em função da força requerida para deslocar as partículas do solo já que elas alongam diretamente dele (CLARK et al., 2003). Atkinson et al. (2007) desenvolveram um modelo de qualidade do solo de estabelecimento (SQE) que previu com sucesso o estabelecimento da cultura, ao longo de duas estações e tipos de solo, baseado em métodos de preparo convencional e nas propriedades físicas do solo. O modelo encontrado por eles explicou mais de 50% da variação total na emergência e estabelecimento da cultura do trigo. Através da análise de imagem da estrutura do solo da cama de semeadura proveniente de diferentes implementos de preparo, Atkinson et al. (2009) observaram que o estabelecimento da cultura foi significativamente reduzido pelo aumento no espaço poroso do solo, o qual eles atribuíram ao reduzido contato solo-semente e a falta de captura de nutrientes pelos poros de transmissão.

A emergência e o estabelecimento da cultura são significativamente afetados, por exemplo, pela variabilidade da textura e estrutura do solo, temperatura e umidade. Blake et al. (2003) mostraram que a textura do solo influenciou o estabelecimento das culturas, sendo responsável por 11,6% da variação de estabelecimento das culturas de inverno e 4,9% do estabelecimento das culturas de primavera. Jakobsen e Dexter (1987) mostraram a influência da resistência à penetração sobre a emergência e estabelecimento da cultura. Eles observaram que valores de RP superiores a 0,8 MPa afetaram a emergência de trigo, enquanto valores acima de 5 MPa paralisaram seu crescimento. Masle e Passioura (1987) observaram que solos com densidades muito altas ou muito baixas reduziram a emergência da cultura de trigo. Nasr e Selles (1995) encontraram uma rápida queda na taxa de emergência de trigo quando a densidade do solo ultrapassou $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$. Comia et al. (1994) não observaram diferenças no conteúdo de água, distribuição de tamanho de agregados e emergência de milho entre a cama de semeadura de um solo sob preparo convencional e reduzido. Diaz-Zorita (2000) relataram que a cama de semeadura originada do preparo convencional resultou em aumento do crescimento vegetativo e produtividade de milho quando comparado com o sistema plantio direto, para eles isso ocorreu em função da redução da RP provocada pelo preparo do solo. Licht e Kaisi (2005) avaliaram algumas propriedades físicas da cama de semeadura de um solo sob plantio direto, preparo em faixas e preparo convencional. Eles observaram que o sistema plantio direto e o preparo em faixas apresentaram semelhantes condições de RP e umidade do solo, e que ambos apresentaram uma melhor emergência de milho que o preparo convencional. Entretanto, Atkinson et al. (2009) destacam que um pobre estabelecimento da cultura não é somente devido às propriedades físicas do solo, estando relacionado também outros fatores, tais como: resíduos culturais, época e densidade de semeadura, contato solo-semente, condições climáticas, cultivos anteriores, dentre outros.

A maioria dos estudos de cama de semeadura tem focado, principalmente, em propriedades físicas como densidade do solo, resistência à penetração, conteúdo de água no solo, estabilidade de agregados, porosidade total sob sistemas de preparo convencional. Assim, torna-se importante, estudos que avaliem o comportamento físico de outras propriedades do solo, com vistas a melhorar entender a influência dessas na cama de semeadura do solo e emergência das culturas. É importante também estudar a condição física do solo da cama de semeadura em sistema plantio direto, uma vez que para este sistema existem poucas informações disponíveis (DRURY et al., 2003).

O sistema plantio direto (SPD) é um dos mais importantes sistemas de manejo do solo para a produção de grãos da agricultura moderna, sendo cultivado em uma área de

aproximadamente 117 milhões de hectares no mundo, dos quais cerca de 26 milhões de hectares no Brasil (FEBRAPDP, 2012). A manutenção de cobertura na superfície do solo protegendo-o da erosão e, adicionalmente, conservando a água no solo e aumentando o teor de carbono orgânico são alguns dos benefícios que faz deste um sistema de manejo sustentável do solo (LAL, 2000; SHAVER et al., 2003) e com grande potencial de expansão, principalmente, em regiões tropicais e subtropicais. A ausência de revolvimento e o intenso tráfego de máquinas são considerados os principais responsáveis pela compactação superficial do solo no SPD (HAKANSSON et al., 1988; REICHERT et al., 2009). A compactação do solo é um dos fatores que afetam adversamente o funcionamento do solo para o crescimento das plantas. Logsdon e Karlen (2004) relataram que a compactação afeta, principalmente, a germinação e emergência das sementes e o desenvolvimento inicial das raízes, as quais são primordiais para o estabelecimento das culturas.

Uma das formas mais utilizadas na agricultura para aliviar a compactação superficial em solos cultivados é a escarificação mecânica (EVANS et al., 1996; AKINCI et al., 2004; CAMARA; KLEIN, 2005a, 2005b). O principal objetivo desta prática é romper a camada compactada de forma a aumentar a porosidade, diminuir a densidade, elevar a infiltração e retenção de água no solo, e facilitar a penetração de raízes. Os escarificadores como implementos de hastes apresentam vantagens sobre os de discos, uma vez que não causam revolvimento do solo, apresentando assim uma maior capacidade operacional e uma menor alteração da estrutura do solo (CAMARA; KLEIN, 2005a). A escarificação mecânica requer alto gasto de energia e para ser economicamente viável seus benefícios precisam perdurar por alguns anos (EVANS et al., 1996). Sojka et al. (1990) afirmaram que a persistência da escarificação é dependente de vários fatores, dentre eles a extensão inicial da escarificação e a resistência do solo à reconsolidação de acordo com o regime de chuvas.

Muitos trabalhos têm demonstrado os efeitos da escarificação mecânica sobre propriedades físicas do solo. No entanto, a longevidade dos benefícios da escarificação mecânica é muito variável em função do solo, clima e condições de execução da operação. Apesar desta variabilidade, a literatura indica um efeito residual médio de dois anos (TWOMLOW et al., 1994; VIEIRA; KLEIN, 2007), entretanto muitos têm encontrado um efeito de curta duração, que varia desde poucos meses a até menos de dois anos (EVANS et al., 1996; MAHL et al., 2008; NICOLOSO et al., 2008).

Os efeitos residuais da subsolagem foram vistos por Busscher et al. (1995) até os dois anos após sua aplicação por uma significativa menor resistência a penetração e maior produtividade de milho que o plantio direto não subsolado. Evans et al. (1996) investigaram

os efeitos da subsolagem nas propriedades físicas e produtividade de milho. A subsolagem teve efeito significativo na densidade e umidade do solo, porém esses efeitos diminuíram rapidamente com o tempo. Eles concluíram que a partir de um ano da subsolagem, os efeitos começaram a desaparecer com as propriedades físicas retornando aos mesmos valores da área não subsolada. Secco e Reinert (1997) observaram que os efeitos benéficos da escarificação mecânica duraram apenas 10 meses, a qual proporcionou uma maior porosidade total e maior rugosidade superficial do solo em PD. Semelhante resultado foi obtido por Nicoloso et al. (2008) que evidenciaram as melhorias nas propriedades físicas até os nove meses após a escarificação. Ralish et al. (2001) encontraram efeitos imediatos da escarificação mecânica na resistência do solo à penetração em PD na camada superficial do solo, porém concluem que os efeitos tendem a se neutralizar após um ano da escarificação. Pierce et al. (1992) obtiveram um efeito residual da escarificação mecânica na densidade e porosidade do solo e ressaltam que este efeito perdurou por no máximo dois anos. Mahl et al. (2008) relataram uma menor RP na camada superficial após os 18 meses da escarificação mecânica, entretanto não observaram diferenças na produtividade de milho entre o solo escarificado e o não escarificado.

Vieira e Klein (2007) concluíram que a escarificação mecânica não influenciou a densidade do solo, mas promoveu aumento da condutividade hidráulica e taxa de infiltração de água até os dois anos após aplicação desta operação. Calonego e Rosolem (2010) também encontraram melhorias na condição física do solo até os dois anos após a escarificação mecânica. Secco et al. (2009) observaram um aumento na produtividade de milho em um Latossolo Vermelho submetido à escarificação mecânica. A escarificação do solo em PD reduziu a densidade e aumentou a rugosidade superficial, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no solo avaliada aos seis meses após a escarificação (CAMARA; KLEIN, 2005a). Ferreras et al. (2001) observaram uma menor produtividade de soja em PD comparado ao PDE, a qual foi atribuída à maior RP em PD que afetou a absorção de água e nutrientes do solo. Para Camara e Klein (2005b) a escarificação mecânica esporádica em PD resulta em melhores condições físicas do solo para desenvolvimento das plantas.

Embora não haja um consenso com relação à duração, os resultados de pesquisa sugerem que a escarificação mecânica do solo é uma prática de caráter temporário, tendo em vista os altos custos para sua aplicação. Devido a isso, plantas com um sistema radicular profundo e agressivo introduzidas na sequência da rotação de culturas tem sido uma estratégia utilizada para aliviar problemas de compactação em plantio direto (UNGER; KASPAR,

1994). Entretanto, os efeitos das raízes na estrutura do solo dependem das espécies utilizadas, constituição do solo e fatores ambientais (MONROE; KLADIVKO, 1987).

Os estudos de métodos sem mobilização do solo para aliviar a compactação são escassos e não tem sido extensivamente pesquisados (WILLIAMS; WEIL, 2004). As principais culturas utilizadas com a finalidade de promover a escarificação biológica do solo foram a alfafa (MEEK et al., 1990), a canola (WILLIAMS; WEIL, 2004), a colza (CHEN; WEIL, 2010), a crotalária (ABREU et al., 2004; REINERT et al., 2008) e o nabo forrageiro (WILLIAMS; WEIL, 2004; KUBOTA et al., 2005; NICOLOSO et al., 2008; REINERT et al., 2008; CHEN; WEIL, 2010). Angers e Caron (1998) relatam que, com o cultivo de plantas de sistema radicular agressivo, ocorre a compressão lateral do solo pela raiz e pela ação de microorganismos que atuam na decomposição da mucilagem produzida pela raiz. As espécies de plantas com esse potencial de penetrar em solos com alta resistência, geralmente possui uma raiz pivotante profunda (HAMZA; ANDERSON, 2005). Assim, ocorre o alargamento dos poros existentes e a criação de novos poros, chamados de bioporos, os quais são mais estáveis que aqueles formados pelo preparo do solo. Aliado a isso, esses bioporos propiciam o aumento no tamanho dos macroporos, da infiltração de água no solo, criando caminhos preferenciais para o desenvolvimento radicular da cultura subsequente pela criação de pontos de menor RP (CRESSWELL; KIRKEGAARD, 1995). O SPD tende a formação dos bioporos, pela conservação do ambiente natural, adição continuada de matéria orgânica e proliferação de microorganismos (STIRZAKER et al., 1996). Estes autores relatam que as principais vantagens da escarificação biológica são: a mobilização homogênea das camadas do solo, redução de custo da operação mecanizada e adição de matéria orgânica em camadas mais profundas, e aumento da atividade microbiana.

Uma significativa maior produtividade de soja em solo cultivado com o consórcio nabo forrageiro + centeio do que em solo sem este consorcio foi obtido por Williams e Weil (2004). Os autores atribuíram essa maior produtividade ao fato da cultura da soja ter se beneficiado pelos canais de raízes deixados no solo pelo nabo forrageiro e centeio, facilitando seu enraizamento no perfil e exploração de maior volume de solo. Meek et al. (1990) observaram um aumento na taxa de infiltração do solo em PD compactado devido aos canais deixados pelo cultivo da alfafa. Nicoloso et al. (2008) utilizaram o consórcio nabo forrageiro + aveia preta para descompactação biológica do solo e concluíram que o mesmo foi eficiente em aumentar a macroporosidade, diminuir a RP e aumentar a infiltração de água no solo. Eles ainda observaram que as maiores produtividades de soja foram obtidas após o cultivo do nabo forrageiro. As culturas mucuna, crotalária, guandu e feijão-de-porco foram utilizadas por

Reinert et al. (2008) para promover a escarificação biológica do solo. Eles concluíram que todas as espécies avaliadas podem ser utilizadas em solos compactados, desde que a densidade do solo não seja superior a $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$. Condições físicas favoráveis ao crescimento vegetal foram também obtidas pelo cultivo da mucuna e feijão-de-porco na camada 0-10 cm, conforme os resultados mostrados por Lanzasova et al. (2010). Chen e Weil (2010) avaliaram a sensibilidade do nabo forrageiro, centeio e colza à compactação do solo e sugeriram que o uso do nabo forrageiro como uma ferramenta biológica de preparo pode ser mais útil em aliviar os efeitos da compactação em SPD. McCallum et al. (2004) relatam que o cultivo de longa duração de alfafa resultou em aumento do número de poros grandes ($>2 \text{ mm}$) comparado com culturas anuais contínuas. Eles ressaltam que esses bioporos foram mantidos no mínimo por até dois anos após cultivo da alfafa.

Abreu et al. (2004) concluíram que a eficácia da ruptura da camada compactada do solo depende da propriedade hídrica ou mecânica do solo usada como indicadora. Usando a condutividade hidráulica do solo saturado, a escarificação biológica foi mais eficaz, em médio prazo, na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água do que a escarificação mecânica do solo. Por outro lado, usando a RP como indicador, se o interesse for a redução da resistência às raízes, o resultado é inverso. Por outro lado, Calonego e Rosolem (2010) afirmaram que embora a escarificação mecânica tenha sido efetiva em aliviar a compactação do solo, seus efeitos foram de curta duração. Por isso eles recomendaram que esta operação fosse substituída pelo cultivo de plantas com sistema radicular profundo e vigoroso como o triticale e o milho que beneficiaram o desenvolvimento radicular do cultivo subsequente com soja, pelo aumento dos bioporos e redução da RP do solo. Em contraposição, Kubota et al. (2005) relatam um aumento da densidade do solo na camada 0-5 cm de profundidade devido ao efeito da pressão exercida no solo pelas raízes do nabo forrageiro. Em estudo realizado por Cresswell e Kirkegaard (1995) não foram detectadas mudanças benéficas na estrutura do solo causada pelo cultivo da canola. Embora alguns estudos não tenham verificado benefícios da escarificação biológica e seu efeito residual não seja pontualmente, Rosolem et al. (2002) destacam que é importante incluir nos sistemas de rotação de culturas, plantas de cobertura que tenham o potencial de melhorar a qualidade física de solos compactados por meio de seu sistema radicular profundo e vigoroso. É importante ainda que a aplicação de plantas para escarificação biológica seja realizada para diferentes tipos de solo, condições climáticas e manejos do solo com vistas a efetivamente evidenciar o potencial dessas plantas como descompactadores biológicos do solo.

Para melhor entender a influência das práticas de manejo no solo, alguns indicadores físicos do solo têm sido propostos com a finalidade de interpretar o efeito da condição física do solo resultante no crescimento das plantas. Eavis (1972) e Phene e Beale (1976) foram pioneiros em estabelecer relações entre crescimento de planta e propriedades físicas do solo (densidade do solo e potencial de água no solo) com o foco na sua qualidade. Baseado nisso Letey (1985) desenvolveu o conceito de *non-limiting water range* (NLWR) adicionando no conceito de água disponível a influência da aeração e resistência à penetração. Silva et al. (1994) aprimorou este conceito, incluindo a densidade do solo em função do conteúdo de água no solo, sendo chamado de *least limiting water range* (LLWR), que traduzido para o português é conhecido como intervalo hídrico ótimo (IHO) (TORMENA et al., 1998).

O IHO é considerado um importante índice na avaliação da qualidade estrutural do solo, pois integra num único índice três fatores relacionados ao crescimento da planta: resistência à penetração, aeração e potencial de água no solo (SILVA et al., 1994; SILVA; KAY, 2004). Para Bulmer e Simpson (2005) este é o maior benefício do conceito do IHO, uma vez que permite que os diversos fatores limitando o crescimento da planta possam ser integrados dentro de único parâmetro. O IHO é definido como uma extensão do conteúdo de água dentro do qual as limitações para crescimento das plantas associado ao potencial de água, aeração e resistência à penetração são mínimos (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1999).

O conteúdo de água e o potencial da água no solo exercem influência sobre as condições para crescimentos das plantas, devido à sua relação com a aeração e resistência à penetração (LETEY, 1985). Então, a variação no conteúdo de água causa mudanças nessas propriedades e a interação entre elas podem afetar o desenvolvimento da plantas. Devido essa interação, é difícil definir limites críticos para cada propriedade, assim a determinação de único índice pode ser útil para avaliar a qualidade estrutural do solo e os impactos do manejo na produtividade do solo e respostas das culturas (TORMENA et al., 1998).

O IHO é determinado pela diferença entre o limite superior e o inferior de disponibilidade de água no solo. O limite superior é considerado o menor valor do conteúdo de água na capacidade de campo ou aquele em que a porosidade de aeração se torna limitante, enquanto o limite inferior é definido pelo conteúdo de água no ponto de murcha ou aquele no qual a resistência à penetração se torna limitante (KAY et al., 1997). Estes limites foram obtidos de alguns estudos que associaram uma condição ideal para o crescimento das plantas com uma porosidade de aeração mínima de 10% (GRABLE; SIEMER, 1968), e o valor de 2,0 MPa como o limite de resistência à penetração para o crescimento radicular (TAYLOR et al.,

1966; SILVA et al., 1994), além da disponibilidade de água no solo, a qual é limitada pela capacidade de campo (-0,01 MPa) e ponto de murcha (-1,5 MPa), conhecida como água disponível. Dessa forma, observa-se que o IHO melhora o conceito de água disponível pela adição da aeração e resistência a penetração limitantes. Assim, um solo com estrutura próxima da ideal tem um IHO numericamente igual à água disponível. Contrariamente solos com estrutura degradada poderá ter a porosidade de aeração como limite superior e/ou a resistência a penetração como limite inferior do IHO.

A degradação da estrutura do solo resulta em modificações no seu sistema poroso, pelo aumento da densidade do solo e resistência a penetração, e decrescimento da macroporosidade do solo. Consequentemente ocorre a redução do IHO com efeitos negativos para as plantas. Silva e Kay (1997) relataram que um solo com IHO mais amplo há menor probabilidade de ocorrência de estresses físicos e que as plantas seriam provavelmente mais produtivas; por outro lado, um estreito IHO implica em maior probabilidade de ocorrer estresses físicos por reduzida aeração ou excessiva resistência, comprometendo dessa forma o desenvolvimento das plantas. A densidade do solo no qual o IHO é igual a zero é conhecida como densidade do solo crítica (SILVA et al., 1994). Quando ocorrem no solo valores de densidade maiores que o da densidade do solo crítica, existe indicação de severa degradação estrutural do solo. Dessa forma, Tormena et al. (2007) afirmam que o IHO significa um grande avanço em termos de biofísica do solo, pois é um útil indicador da qualidade física do solo para crescimento das plantas.

A avaliação da qualidade física e estrutural do solo pela determinação do IHO tem sido largamente usada por diferentes objetivos: sistema de cultivo e manejo do solo (BETZ et al., 1998; LEÃO et al., 2006; TORMENA et al., 2007; ASGARZADEH et al., 2010; FIDALSKI et al., 2010; OLIBONE et al., 2010; CALONEGO; ROSOLEM, 2011; KADZIENE et al., 2011), sistemas florestais (ZOU et al., 2000; BULMER; SIMPSON, 2005; SIEGEL-ISSEM et al., 2005; GARTZIA-BENGOETXEA et al.; 2009), aplicação de esterco e fertilizantes (WU et al., 2003), emissão de gases (YOO; WANDER, 2006; YOO et al., 2006; DRURY et al., 2003; MEDEIROS et al.; 2011) dentre outros. A maioria dos estudos tem concluído que o IHO é um potencial indicador da qualidade do solo para um manejo sustentável. Benjamin et al. (2003) determinaram o IHO com vistas a avaliar diferentes sistemas de manejo e concluíram que o IHO pode ser uma medida útil dos efeitos do manejo no solo e que práticas de manejo que maximizam o IHO podem maximizar o potencial do solo para produção de culturas. Wu et al. (2003) realizaram um estudo para investigar os efeitos de alguns fatores de manejo sobre IHO e encontraram que sob sistema de cultivo

orgânico o solo teve um IHO relativamente estreito devido ao menor conteúdo de água retido na capacidade de campo, indicando que a superfície do solo sob este sistema provavelmente tem poros maiores.

Araujo et al. (2004) avaliando um Latossolo sob plantio direto consolidado e escarificado observaram efeitos benéficos da escarificação no IHO para a camada de 0-15 cm, no entanto, para a camada de 15-30 cm a escarificação reduziu o IHO, em virtude da resistência à penetração que se comportou como limite inferior em toda a extensão do IHO. Lapen et al. (2004) avaliaram o IHO em plantio direto e preparo convencional na cultura do milho e verificaram uma menor porosidade de aeração e concentração de oxigênio no plantio direto quando comparado com o preparo convencional do solo. Todavia eles observaram que o preparo continuado do solo aumenta o risco de limitação pela aeração nesse solo. Leão et al. (2006) utilizaram o IHO para avaliar a qualidade física do solo após conversão do cerrado em sistemas de pastejo, e mostraram que o IHO foi afetado pelos sistemas de pastejo, sendo o sistema de pastejo de curta duração mais prejudicial à qualidade física do solo que o sistema de pastejo contínuo. Tormena et al. (2007) avaliaram o IHO em sistema plantio direto com sucessão, rotação de culturas e escarificação e observaram que no plantio direto com rotação, a maior retenção de água em elevados potenciais aumentou temporalmente o IHO.

Contudo, existe a demanda por trabalhos que correlacionem o IHO com o crescimento das plantas, uma vez que poucos trabalhos têm feito isso (SILVA; KAY, 1996; SHARMA; BUSHAN, 2001; BENJAMIN et al., 2003; VERMA; SHARMA, 2008). Para as plantas expressarem seu potencial produtivo é necessário uma adequada disponibilidade de água e oxigênio. Essa relação entre a condição física do solo e os parâmetros da cultura é conhecida como produtividade física do solo (VERMA; SHARMA, 2008), e tem sido testada com sucesso por alguns autores. Silva e Kay (1996) estudaram o efeito do IHO sobre o crescimento de milho, relacionando o crescimento da planta com a proporção de medidas de umidade do solo que ficaram fora dos limites do IHO. Eles observaram que o crescimento foliar declinou linearmente com os valores de umidade fora do IHO ($r^2=0,94$) e aumentou de forma não-linear com o IHO ($r^2=0,80$). Eles concluíram que os valores de umidade do solo fora do IHO foram um parâmetro auxiliar para correlacionar o IHO com crescimento de planta, e que quando a umidade está fora dos limites do IHO houve um menor desenvolvimento foliar e radicular do milho. Benjamin et al. (2003) por sua vez, avaliaram a influência do IHO na produtividade das culturas e obtiveram uma significativa correlação entre IHO e produtividade de trigo. Eles determinaram também dias de estresse por água (DEA), o qual se correlacionou negativamente com a produtividade de milho. Concluíram que

o uso do IHO associado ao DEA foi útil para acessar os efeitos do manejo no potencial produtivo das culturas. Neste sentido, Benghough et al. (2006) destacam que o IHO em associação com a variação espacial do conteúdo de água é a melhor estratégia para indicar possíveis restrições físicas às plantas. Assim, a magnitude do IHO pode ser usada como diagnóstico da frequência com que a estrutura do solo determina condições de conteúdo de água que impõe limites para o crescimento das plantas (TORMENA et al., 1998).

Sharma e Bhushan (2001) investigaram os efeitos da incorporação de lantana (*Lantana spp.*) no IHO, água disponível e produtividade de trigo. As aplicações de lantana afetaram o IHO, pelo decréscimo da densidade do solo e resistência a penetração, e aumento na porosidade de aeração. Eles obtiveram uma linear e positiva correlação entre IHO e produtividade de trigo, mostrando que o IHO foi um útil indicador da qualidade física do solo para crescimento das plantas. Verma e Sharma (2008) investigaram os efeitos de sistemas de cultivo de longa duração e o uso de fertilizantes químicos com e sem adubo orgânico na produtividade física do solo. Eles encontraram uma melhoria na qualidade física do solo pela aplicação de fertilizantes com adubo orgânico no sistema de cultivo soja/trigo/pastagem. Uma linear e positiva correlação foi obtida entre IHO e produtividade de trigo, demonstrando a sensibilidade do IHO como índice de qualidade física do solo. Gathala et al. (2011) também encontraram uma positiva e significativa correlação entre IHO e produtividade de trigo quando estudaram a resposta das plantas na rotação arroz/trigo em plantio direto e preparo convencional. Eles concluíram que a rotação arroz/trigo em plantio direto ofereceu uma melhor condição física para produção de trigo.

Alguns autores avaliaram indiretamente a relação entre IHO e crescimento de planta. Bulmer e Simpson (2005) observaram uma melhor sobrevivência e crescimento de mudas de pinus em condição de baixa compactação e alto nível de água no solo, situação esta que coincidiu com os maiores valores de IHO. Beutler et al. (2008) obtiveram um decréscimo na produtividade de soja em um solo de textura média a partir de densidade do solo igual a $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, valor este equivalente à densidade do solo crítica obtida no IHO. Siegel-Issem et al. (2005) observaram que o comprimento radicular de mudas de pinus foi duas vezes maior em solo com conteúdo de água dentro dos limites do IHO do que mudas crescendo fora do IHO. Betz et al. (1998) avaliaram o IHO na zona radicular de soja e milho em diferentes sistemas de manejo com e sem tráfego. Eles observaram que o plantio direto com tráfego foi o sistema de manejo mais limitante para o crescimento do sistema radicular das culturas comparado preparo convencional e escarificado. Lapen et al. (2004) determinaram o IHO para verificar a influência no estabelecimento e produtividade de milho. Eles observaram que dentre os

fatores que compõe o IHO, a porosidade de aeração foi o indicador que melhor explicou a variabilidade na produtividade da cultura, verificando que onde houve baixa porosidade de aeração houve também um baixo estabelecimento e produtividade de milho. Estes trabalhos indicam, portanto, o potencial do IHO como indicador da qualidade do solo para produção das culturas.

As altas e significantes correlações obtidas entre IHO e parâmetros de planta acima relatados justificam mais estudos para determinar a relação entre IHO e outras culturas, bem como outros parâmetros da planta (parâmetros de emergência, por exemplo), solos e condições climáticas. Visto que, para o IHO desempenhar efetivamente sua função de indicador da qualidade do solo para desenvolvimento das plantas é preciso compreender e estabelecer melhor sua relação com os parâmetros de crescimento das culturas.

A resistência tênsil e a estabilidade de agregados, por sua vez, são duas das mais importantes propriedades estruturais que podem afetar a qualidade física do solo da cama de semeadura para o desenvolvimento das plantas. O tamanho dos agregados determina o espaço poroso do solo, o qual afeta, por sua vez, o movimento e a distribuição de água, ar e calor dentro do solo (SKIDMORE; POWERS, 1982). A estabilidade de agregados, e, por consequência o arranjo do sistema poroso, é uma função das forças coesivas entre as partículas para suportar a aplicação de uma força destrutiva (KEMPER; ROSENAU, 1986). Dentre as características dos agregados, a resistência tênsil é definida como o estresse ou força por unidade de área requerida para fraturar os agregados do solo quando submetidos à ação de uma pressão (DEXTER; WATTS, 2000). Isso reflete a facilidade de fragmentação do solo ou redução dos tamanhos dos agregados por diferentes processos (KAY et al., 1994) tais como umedecimento e secamento, congelamento e descongelamento, tráfego de máquinas, preparo e práticas de manejo do solo (SKIDMORE; POWERS, 1982).

Tanto a estabilidade de agregados quanto a resistência tênsil podem ser consideradas importantes indicadoras da qualidade física do solo, especialmente da condição estrutural da cama de semeadura do solo (SNYDER et al., 1995; WATTS; DEXTER, 1998). De maneira geral, a resistência tênsil representa a pressão que a plântula deveria aplicar para emergir. Portanto, pode ser usada como um indicador dos efeitos do manejo na qualidade do solo, devido à resposta do solo aos processos físicos e mecânicos estarem ligados à sua manipulação, tais como preparo, selamento superficial, penetração radicular, emergência (TORMENA et al., 2008a). Já a estabilidade de agregados, é a propriedade física que determina a sustentação do solo para que o processo de emergência ocorra adequadamente.

A resistência tênsil dos agregados é uma propriedade dinâmica sob condições de campo (KAY; DEXTER, 1992). A ruptura dos agregados ocorre nos planos de fraqueza existentes nos mesmos, derivados das fissuras e microfissuras que formam zonas de menor resistência dentro dos agregados. A heterogeneidade resultante desses planos de fraqueza é denominada friabilidade do solo (DEXTER; WATTS, 2000). A friabilidade é definida como a tendência que uma massa de solo tem de se desfazer em agregados de menores tamanhos sob aplicação de um estresse ou carga (WATTS; DEXTER, 1998), o que é de fundamental importância durante a emergência das plântulas. Assim, a friabilidade do solo é considerada sinônimo de qualidade física do solo (UTOMO; DEXTER, 1981) e é desejável para o adequado estabelecimento das plantas (WATTS; DEXTER, 1998). Os valores elevados de friabilidade indicam que agregados maiores possuem menor resistência à ruptura do que agregados menores (TORMENA et al., 2008b).

Conforme relatado por Tormena et al. (2008a), tanto a resistência tênsil quanto a friabilidade têm sido pouco utilizadas para avaliar os efeitos de sistemas de manejo na estrutura em solos tropicais. Alguns estudos como o de Guimarães et al. (2009) determinaram a resistência tênsil e friabilidade dos agregados de solo sob sistema de integração lavoura-pecuária e observaram que o aumento no carbono orgânico do solo promoveu aumentos da resistência tênsil do solo na camada de 10-20 cm. Embora tenha ocorrido uma diminuição da friabilidade observada nas camadas superficiais, o sistema de integração lavoura-pecuária não propiciou condições físicas limitantes aos cultivos anuais subsequentes. Avaliando diferentes sistemas de manejo do solo, Bavoso et al. (2010) encontraram maiores valores de RT em plantio direto, do que em plantio direto subsolado e outros sistemas de preparo convencional. Por outro lado, Abid e Lal (2009), no entanto, encontraram menores valores de RT em sistema plantio direto comparado ao sistema convencional de preparo do solo. Portanto, observa-se que não existe um consenso na literatura sobre o sistema plantio direto apresentar maiores valores de RT do que sistemas de manejo com algum tipo de preparo. Tormena et al. (2008b) avaliando a resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob floresta nativa, pousio e cultivado, verificaram um aumento da RT indicando a degradação da estrutura do solo a medida que o uso do solo foi se intensificando. Para eles a resistência tênsil dos agregados e a friabilidade do solo retrataram os efeitos dos sistemas de uso nas condições físicas e estruturais do solo. Tormena et al. (2008a) avaliaram os efeitos de sistema plantio direto, com rotação e sucessão de culturas, e escarificado, na resistência tênsil de agregados e na friabilidade de um Latossolo Vermelho distroférico. Embora eles tenham encontrado maiores valores de RT no plantio direto com rotação de culturas que no escarificado, a friabilidade

resultante para os tratamentos foi classificada como friável a muito friável. Eles concluíram que a escarificação mecânica não trouxe ganho de qualidade estrutural do solo comparado ao plantio direto com rotação de culturas, podendo então ser substituída por este último sistema uma vez que este manteve a estrutura do solo temporalmente estável e mais favorável ao desenvolvimento das plantas.

O conhecimento da estabilidade estrutural do solo bem como dos fatores que a afetam é importante na avaliação de atributos como: permeabilidade ao ar, infiltração de água, erosão do solo, emergência de plântulas e predição da capacidade do solo em sustentar sistemas agrícolas de longa duração (MBAGWU; AUERSWALD, 1999). Grohmann (1960) destaca que embora a estabilidade estrutural em água seja uma medida relativa, se realizada em condições experimentais bem definidas e controladas, oferece medida com a qual é possível comparar as condições estruturais de diferentes solos, ou de um mesmo solo sujeito a diferentes manejos. A estabilidade de agregados é usualmente determinada pelos métodos descritos em Kemper e Rosenau (1986) e Yoder (1936). O método desenvolvido por Becher e Kainz (1983) e utilizado neste estudo se baseia na quantidade de água percolada ao longo do tempo através de uma coluna de agregados e, por isso, é chamado de estabilidade de percolação.

O princípio de funcionamento deste método é que na medida em que os agregados são umedecidos, a água é atraída para o seu interior por forças adesivas e, então, desloca e comprime o ar dentro dos agregados (MBAGWU; AUERSWALD, 1999). Se a pressão exercida intra-agregado for alta o bastante para superar as forças de coesão, os agregados se fragmentam, formando microagregados de diferentes tamanhos e forças de coesão. Com isso, esses microagregados são deslocados para posições mais baixas na coluna de solo, bloqueando os poros condutores de água e, conseqüentemente, ocorrerá uma redução na quantidade de água percolada por unidade de tempo. Em resumo: a passagem de água através da coluna de agregados será tanto maior quanto mais estáveis forem os agregados do solo (MBAGWU; AUERSWALD, 1999). A determinação da estabilidade de agregados do solo pelo método da percolação praticamente não é muito utilizada em estudos feitos com solos tropicais e subtropicais do Brasil. No entanto, diversos estudos relatam que a medida da estabilidade de agregados pela estabilidade de percolação é bastante sensível para detectar diferenças entre sistemas de cultivo e manejo do solo (SIEGRIST et al., 1998; MBAGWU; AUERSWALD, 1999; FIENER; AUERSWALD, 2006; VAKALI et al., 2011).

A medida de estabilidade de agregados pela percolação é classificada em rápida, moderada e lenta. Uma rápida percolação indica uma boa qualidade estrutural, uma vez que é

a classificação encontrada para solos sob floresta, conforme destacaram Mbagwu e Auerswald (1999). Esses autores avaliaram a estabilidade de percolação para diferentes usos da terra (floresta, floresta secundária, pastagem, preparo convencional, plantio direto) e observaram que o uso da terra influenciou mais a estabilidade de percolação que as propriedades intrínsecas do solo e que houve um aumento da estabilidade de percolação com os aumentos dos teores de carbono orgânico. Siegrist et al. (1998) utilizaram a estabilidade de percolação para avaliar sistemas biológicos e convencionais de produção e afirmaram que o método da percolação de água foi sensível em detectar diferenças na estabilidade de agregados dos sistemas de manejo avaliados. Fiener e Auerswald (2006) utilizaram a estabilidade de percolação para avaliar a suscetibilidade do solo à erosão sob cultivo de batata, milho e trigo. A menor estabilidade de agregados do solo cultivado com batata aliado a outros resultados indicaram que esse sistema devido o menor aporte de matéria orgânica tendeu a ser mais suscetível à erosão.

Vakali et al. (2011) utilizando também a metodologia da percolação de água na avaliação da estabilidade de agregados, observaram que sistemas de manejo com mobilização do solo resultaram em menor estabilidade de agregados que o sistema PD. Carpenedo e Mielniczuk (1990) destacam que sistemas de manejo como o plantio direto essa maior estabilidade de agregados se deve ao maior acúmulo de matéria orgânica proporcionado por esse sistema. Uma maior estabilidade de agregados em sistema PD ou sistemas que propiciem um grande aporte de matéria orgânica foram também obtidos por Castro Filho et al. (1998), Wohlenberg et al. (2004), Wendling et al. (2005), Salton et al. (2008). Calonego e Rosolem (2008) avaliaram a estabilidade de agregados por três anos em plantio direto escarificado e submetido a diferentes rotações envolvendo plantas de cobertura e observaram que a estabilidade dos agregados foi influenciada pela rotação de cultura, e que a escarificação mecânica promoveu redução da estabilidade dos agregados na camada de 5 a 10 cm. Todavia, eles ressaltam que essa desestruturação do solo foi recuperada aproximadamente seis meses depois com o cultivo outono/inverno. Veiga et al. (2009), por sua vez, avaliaram a estabilidade de agregados em plantio direto (PD) consolidado e escarificado, e preparo convencional. O PD consolidado apresentou maior estabilidade de agregados que o PC, porém igual ao PD escarificado, assim a prática da escarificação mecânica não foi recomendada com vistas a melhorar a qualidade física do solo.

A estrutura do solo e a geometria do espaço poroso são as principais características que controlam os fluxos e processos de transporte no solo (TULI et al., 2005). Assim a permeabilidade ao ar e a condutividade hidráulica são as principais propriedades do solo

relacionadas a esses processos (POULSEN et al., 2003). A permeabilidade do solo ao ar (K_a) é um processo de grande importância na avaliação da disponibilidade de oxigênio para o sistema radicular das plantas, responsável por promover a troca adequada de gases entre o ambiente radicular e a atmosfera, afetando diretamente o seu desenvolvimento. Isso faz com que a quantificação de propriedades relacionadas com a capacidade do solo em transmitir O_2 até as raízes seja fundamental para a avaliação da qualidade física do solo (SILVA et al., 2009).

A permeabilidade ao ar é definida como a habilidade do solo em transmitir ar através de poros interconectados em resposta a um gradiente de pressão de ar, por um processo chamado fluxo convectivo (ROSEBERG; MCCOY, 1990; LAL, 2000). O fluxo convectivo é baseado na Lei de Darcy, em que a taxa do fluxo de um fluido através de uma coluna porosa é diretamente proporcional ao gradiente de pressão (BALL; SCHØNNING, 2002). Roseberg e McCoy (1990) destacam que assim como a condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar é uma função do conteúdo volumétrico de água, porosidade, distribuição e geometria de poros. Portanto a permeabilidade ao ar é uma medida sensível às mudanças na estrutura do solo (FISH; KOPPI, 1994). O conhecimento da quantidade de ar disponível no solo depois de realizadas as diferentes práticas de cultivo pode auxiliar os agricultores e pesquisadores a planejar com eficiência as exigências de manejo para a produção de uma dada cultura (RODRIGUES et al., 2011). Dessa forma, observa-se que as práticas de manejo têm uma grande influência sobre a aeração do solo.

A condutividade hidráulica é caracterizada pela facilidade com que a água é transmitida ao longo do perfil do solo, sendo, portanto dependente da distribuição e continuidade de poros do solo (REICHARDT, 1990). O estudo da condutividade hidráulica é de grande importância para a produção agrícola e proteção ambiental, uma vez que é fundamental para entender o processo de infiltração, redistribuição e suprimento de água no solo, especialmente em longo tempo (DEXTER et al., 2004; VIEIRA; KLEIN, 2007).

Tanner e Wengel (1957) relataram que a permeabilidade ao ar pode ser usada para quantificar o declínio da estrutura do solo e identificar práticas de manejo que sejam capazes de promover melhorias na estrutura do solo. Braunack e Dexter (1989) relatam que sistemas de preparo convencional do solo promovem uma maior permeabilidade e armazenamento de ar em virtude do aumento no volume de poros resultantes do revolvimento. Uma maior permeabilidade ao ar sob preparo convencional comparado ao plantio direto foi encontrado por Ball et al. (1981) e Heard et al. (1988). Entretanto, o preparo contínuo compacta a camada de solo logo abaixo da profundidade de aração e cria condições críticas para as trocas de ar

(RYDBERG, 1987). Para sistemas de manejo conservacionistas como o plantio direto, os sucessivos cultivos tendem a aumentar a densidade do solo (RYDBERG, 1987) que aliada ao maior conteúdo de água proporcionado por este sistema deixa o solo menos aeróbico (LINN; DORAN, 1984). No entanto, Douglas (1986) encontrou uma forte correlação entre permeabilidade ao ar e macroporos contínuos em sistema PD.

A permeabilidade ao ar pode ser usada para determinar as características de poros do solo. A K_a sofre influência do conteúdo de água no solo, apresentando seu máximo valor em solo seco e o mínimo quando o solo está na saturação (SCHØNNING et al., 1999). Dessa forma, outro fator envolvido nesta relação é a porosidade de aeração, uma vez que um aumento no conteúdo de água implica em redução da porosidade de aeração. Blackwell et al. (1990) usaram a relação entre K_a e a porosidade de aeração para caracterizar e identificar mudanças na estrutura do solo causada pelas práticas de manejo e atividade biológica. Ball (1981) usou a difusividade de gás, a K_a e a porosidade de aeração para descrever a continuidade e tortuosidade de macroporos do solo. Eles determinaram a K_a em vários potenciais mátricos e encontraram uma forte e positiva correlação linear entre K_a e porosidade de aeração. Roseberg e McCoy (1990) mediram a K_a em diferentes conteúdos de água para analisar o comportamento dos macroporos do solo. A relação entre K_a e porosidade de aeração foi também confirmada pelos estudos de Shtykov e Daishev (1986) e McCarthy e Brown (1992), que observaram que solos bem estruturados apresentaram maior K_a .

As mudanças na geometria dos poros foram também avaliadas através da equação de Kozeny-Carman que relaciona K_a e porosidade de aeração, na forma linearizada descrita por Ball et al. (1988). Nesta equação, o *slope* da equação (N) é considerado um índice de continuidade dos poros, refletindo o aumento na K_a com o aumento na porosidade de aeração ou o decréscimo na tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo. Rodrigues et al. (2011) determinaram o índice N em plantio direto e preparo convencional e observaram um maior valor de N para a camada 10 a 20 cm em PD. Eles concluíram que o PD tende a preservar a continuidade de poros em subsuperfície. Os resultados de índice N encontrados por Roseberg e McCoy (1990) e Ball et al. (1988) confirmam essa tendência do SPD.

Os valores de K_a são também relacionados com as propriedades hidráulicas do solo (ALJIBURY; EVANS, 1965; BLACKWELL et al., 1990), e as medidas de K_a em um determinado potencial tem sido usadas para prever a condutividade hidráulica do solo saturado (LOLL et al., 1999; IVERSEN et al., 2003). O fluxo de gases através do solo é comparável ao da água, com certas restrições, pois o ar é compressível e dependente da

densidade e viscosidade, e a gravidade não afeta o fluxo de gás. Contudo, tem sido mostrado que a permeabilidade ao ar é geralmente uma ou mais vezes maior que permeabilidade a água, pois o ar do solo interage com a matriz do solo em um grau muito menor do que a água, que sendo um líquido polar, tende a interagir mais fortemente com a matriz do solo (ALJIBURY; EVANS, 1965; BLACKWELL et al., 1990; LOLL et al., 1999; IVERSEN et al., 2001). Iversen et al. (2001) encontraram uma correlação entre $\log K_a$ e $\log K_{sat}$ para permeabilidade ao ar medida nos potenciais matriciais de -50 e -100 cm H₂O. Loll et al. (1999) mostraram uma significativa regressão entre $\log k_a$ e $\log k_{sat}$ para 1614 amostras em nove diferentes tipos de solo e três horizontes. Shulka et al. (2005) encontraram uma forte correlação entre permeabilidade ao ar e condutividade hidráulica e concluíram que a aeração do solo é um parâmetro muito útil na avaliação da qualidade estrutural do solo em diferentes usos e manejos do solo.

Mielke e Wilhelm (1998) observaram que o aumento da permeabilidade ao ar e da condutividade hidráulica do solo acompanhou o aumento da densidade do solo sob plantio direto, indicando que o aumento da densidade do solo trouxe uma melhoria no sistema poroso do solo. Resultados diferentes foram obtidos por Klein e Libardi (2002) que concluíram que a condutividade hidráulica é diminuída por meio de alterações na estrutura do solo, como o aumento da densidade, a redução da porosidade total e a alteração da distribuição do diâmetro dos poros. Ferreras et al. (2000) encontraram uma menor condutividade hidráulica em plantio direto do que sob preparo convencional. Com vistas a aumentar a capacidade de infiltração de água no solo em plantio direto, a prática da escarificação mecânica tem sido utilizada (CASSEL et al., 1978; CAMARA; KLEIN, 2005). Vieira e Klein (2007) obtiveram um aumento na condutividade hidráulica do solo saturado e na taxa de infiltração de água no solo até os dois anos após a escarificação mecânica. Embora alguns autores tenham encontrado uma maior condutividade hidráulica para o sistema de preparo convencional (MESSING; JARVIS, 1993; LOGSDON et al., 1993), existe a tendência de que a mesma vá diminuindo ao longo do ciclo da cultura devido à quebra da estrutura do solo e selamento superficial, e o crescimento das raízes que vão bloqueando progressivamente os poros (ANKENY et al., 1990; SUWARDJI; EBERBACH, 1998). Já a menor condutividade hidráulica encontrada em plantio direto por alguns estudos pode ser balanceada pela presença de resíduos na superfície do solo, maior armazenamento de água e maior continuidade de poros sob este sistema (LAMPURLANES et al., 2005).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Experimento Escarificação mecânica e biológica do solo – Brasil

2.2.1.1 Descrição da área experimental

O estudo foi conduzido em área localizada na Fazenda Experimental “Capão da Onça”, a qual pertence à Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná (Figura 1). As coordenadas geográficas da área são 25° 05’ 52” S e 50° 02’ 43” O. O solo da área é um Latossolo Vermelho distrófico típico, de classe textural argilo-arenosa (EMBRAPA, 2006) com declividade entre 3 a 8% e altitude de 1080 m. O clima da região é classificado, segundo Köppen, como mesotérmico subtropical úmido do tipo Cfb, com precipitação média anual de 1545 mm e temperatura média anual de 18,7°C (INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR, 2000). As classes de solos predominantes na área são os Latossolos Vermelhos distróficos e os Cambissolos Háplicos distróficos provenientes da alteração de folhelhos do período paleozóico, e solo da área é originado do retrabalhamento de folhelhos e arenitos das formações Ponta Grossa e Furnas (BHERING et al., 2008).

A área vem sendo manejada sob sistema plantio direto há mais de 18 anos e submetida à rotação de culturas com milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine Max* L.) na primavera/verão, e trigo (*Triticum aestivum* L.) e consórcio aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.) no outono/inverno. A escarificação mecânica e o cultivo da planta nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) foram introduzidas na área de cultivo como agentes de descompactação mecânica e biológica do solo, respectivamente. Dessa forma o experimento instalado em maio de 2009, considerou três tratamentos: plantio direto escarificado (PDE), plantio direto cultivado com nabo forrageiro (PDNF) e plantio direto (PD). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com quatro repetições, resultando em 12 parcelas com dimensões de 9 x 50 m cada. As parcelas com PDE foram escarificadas em maio de 2009 com um subsolador tipo Asa laser da Jumbo Matic®, dois dias antes da semeadura da cultura de inverno, até a profundidade de 0,25 m. O subsolador possuía cinco hastes, sendo três na barra dianteira e duas na traseira, de formato parabólico e ponteira em cinzel, com espaçamento entre hastes de 20 cm e ângulo de ataque de 22°. Nas parcelas PDNF, o nabo forrageiro foi semeado com densidade de 22 sementes por metro e espaçamento de 17 cm na entrelinha. As parcelas PD foram cultivadas com aveia + ervilhaca seguindo a seqüência de rotação de culturas estabelecidas para o outono/inverno, bem como as parcelas PDE após a operação da escarificação mecânica. Para semeadura das culturas do milho e da soja foi

utilizada semeadora com discos para colocação das sementes a 0,04 m e com hastes sulcadoras para deposição do adubo a 0,10 m, mobilizando o solo somente nas linhas de plantio.

Figura 1 – Localização geográfica e imagem de satélite da área experimental em Ponta Grossa/Paraná

2.2.1.2 Medições de campo

2.2.1.2.1 Parâmetros de emergência das culturas

Os parâmetros de emergência das culturas milho e soja foram obtidos pela contagem do número de plântulas emergidas por metro em cada um dos pontos selecionados para a coleta de amostras de solo indeformadas. A cultura do milho foi semeada na densidade de 5,6 sementes por metro e a da soja na densidade de 18 sementes por metro. A emergência de milho e soja ocorreu aos sete e cinco dias após a semeadura, respectivamente, passando a ser avaliada diariamente até a estabilização da emergência, a qual ocorreu aos 12 dias após a semeadura para o milho e aos 11 dias para a soja. A partir dos dados de emergência (plantas m^{-1}) foram calculadas a taxa de emergência (TE) (Eq. 1) e o índice de velocidade de emergência (IVE) (Eq. 2) proposto por Maguire (1962):

$$TE = \frac{N_F}{N_S} \times 100 \quad (1)$$

$$IVE = \frac{N_1}{t_1} + \frac{N_2}{t_2} + \dots + \frac{N_n}{t_n} \quad (2)$$

em que N_1 , N_2 , N_n é o número de plântulas emergidas na primeira, segunda e última contagem; t_1 , t_2 , t_n é o número de dias da semeadura à primeira, segunda e última contagem; N_F é o número final de plântulas emergidas e N_S é o número de sementes semeadas em cada metro.

2.2.1.2.2 Resistência à penetração e conteúdo de água no solo

2.2.1.2.2.1 Cultura do milho

A resistência do solo à penetração foi medida diariamente do primeiro ao décimo segundo dia após a semeadura do milho com um penetrômetro eletrônico (Penetrolog, Falker, Brasil). A umidade do solo foi determinada para o mesmo período pelo método gravimétrico (Eq. 3) através de amostras de solo deformadas coletadas próximo aos pontos utilizados na determinação da emergência do milho.

$$U = \frac{MU - MS}{MS} \quad (3)$$

onde, U é a umidade do solo em g g⁻¹; MU é a massa de solo úmido (g) e MS é a massa de solo seco (g) em estufa a 105° C por 24 horas.

A resistência à penetração e a umidade do solo foram determinadas em 10 pontos por parcela até a profundidade de 10 cm, perfazendo um total de 120 pontos. Posteriormente, o conteúdo de água no solo, em base de volume foi determinado pela Eq. (4):

$$\theta = D_s \times U \quad (4)$$

Onde, θ é o conteúdo volumétrico de água no solo (m³ m⁻³), D_s é a densidade do solo (Mg m⁻³) e U é a umidade gravimétrica do solo (g g⁻¹).

2.2.1.2.2.2 Cultura da soja

A resistência à penetração foi medida diariamente do primeiro ao décimo primeiro dia após a semeadura da soja com um penetrômetro manual digital (FGV-200XY, Shimpo, Japão). O conteúdo de água no solo foi determinado concomitantemente à resistência do solo à penetração usando o sensor de umidade 10HS (Decagon Devices, EUA) fornecendo a umidade do solo em base volumétrica (m³ m⁻³). A resistência à penetração e a umidade do solo foram determinadas em 10 pontos por parcela até a profundidade de 10 cm, perfazendo um total de 120 pontos.

2.2.1.3 Precipitação pluviométrica

Os dados de precipitação pluviométrica da área experimental em Ponta Grossa/PR para os anos de 2009 e 2010 estão apresentados na Figura 2. A Figura 2A mostra a precipitação pluviométrica mensal em cada ano na área de estudo, e a Figura 2B mostra a

precipitação pluviométrica ocorrida na cama de semeadura de milho (Outubro/2009) e na cama de semeadura de soja (Novembro/2010).

Figura 2 – Dados de precipitação pluviométrica anual (A) e para o período de cama de semeadura do milho e soja (B) da área experimental em Ponta Grossa/PR. Fonte: Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR) – Pólo Regional de Pesquisa de Ponta Grossa

2.2.1.4 Amostragens de solo

As amostragens foram realizadas em outubro de 2009 e novembro de 2010, respectivamente, durante a fase de semeadura das culturas do milho e da soja. A primeira avaliação ocorreu aos seis meses e a segunda aos dezoito meses após a implantação do

experimento. Foram coletadas dez amostras indeformadas de solo (anéis volumétricos de 5 x 5 cm) por parcela, em pontos selecionados aleatoriamente, nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade, resultando em 120 amostras por profundidade, 240 amostras por cada época e 480 amostras no total. As amostras foram coletadas na linha de semeadura da cultura aproximadamente aos 15 dias após a semeadura. Para a coleta das amostras foi utilizado um amostrador eletro-mecânico que permitiu a retirada das amostras de solo sem aplicação de golpes e com deslocamento do eixo a uma velocidade constante de 2 mm s^{-1} (FIGUEIREDO, 2010). As amostras foram embaladas e acondicionadas em recipientes adequados para o transporte e enviadas ao laboratório, onde foram mantidas em temperatura de aproximadamente 5°C até serem processadas.

2.2.1.5 Determinação das propriedades do solo

2.2.1.5.1 Resistência tênsil dos agregados e friabilidade do solo

Os agregados, para a determinação da resistência tênsil (RT), foram obtidos das amostras indeformadas de solo, que foram manualmente destorroadas em seus agregados naturais. O tamanho de agregados utilizados na determinação da resistência tênsil foi obtido por peneiramento, utilizando-se peneiras com abertura de malha de 4 e 2 mm, conforme metodologia adaptada de Imhoff et al. (2002). Os agregados foram secos ao ar por 24 h e depois em estufa a 40°C por 24 h para homogeneização da umidade. Para as medidas de RT foram separados 5 agregados de cada amostra, resultando em 600 agregados por profundidade, 1200 por época de amostragem e 2400 no total. Para medição da resistência tênsil dos agregados foi utilizado um atuador eletrônico linear com uma célula de carga de 100 kgf. Os agregados foram colocados na posição mais estável em uma plataforma (inferior) que subia em direção à placa superior numa velocidade constante de $0,03 \text{ mm s}^{-1}$ até a ruptura dos agregados confirmada por uma fissura contínua ao longo do agregado. Os valores necessários para fraturar cada agregado foram então registrados para posterior cálculo da RT. Cada agregado foi pesado antes de medida de RT e após a determinação da RT, a massa dos cinco agregados que compunha cada amostra foi levada à estufa a 105°C por 24 horas para determinação da umidade do solo.

A resistência tênsil dos agregados (RT) foi, então, calculada conforme Dexter e Kroesbergen (1985):

$$RT = 0,576 \times \left(\frac{P}{D^2} \right) \quad (5)$$

em que 0,576 é o coeficiente de proporcionalidade; P é a força aplicada (N); e D é o diâmetro efetivo (mm).

O diâmetro efetivo (D) foi calculado de acordo com Watts e Dexter (1998):

$$D = D_m \times \left(\frac{M}{M_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

onde D_m é o diâmetro médio do agregado (mm); M é a massa do agregado individual (g); M_0 é a massa média dos agregados na população (g). O diâmetro médio dos agregados foi considerado igual à média dos tamanhos das peneiras [(4+2) /2] utilizadas para selecionar os agregados.

A friabilidade do solo foi estimada pelo método do coeficiente de variação de acordo com Watts e Dexter (1998):

$$F = \frac{\sigma_Y}{Y} \pm \frac{\sigma_Y}{Y\sqrt{n}} \quad (7)$$

em que F é a friabilidade do solo; σ_Y é o desvio-padrão dos valores medidos de RT; Y é a média dos valores de RT; e n é o número de repetições. O segundo termo da equação se refere ao erro-padrão do coeficiente de variação. As classes de friabilidade utilizadas foram adotadas conforme proposto em Imhoff et al. (2002): não-friável ($F < 0,10$), ligeiramente friável ($F = 0,10$ a $0,20$), friável ($F = 0,20$ a $0,50$), muito friável ($F = 0,50$ a $0,80$) e mecanicamente instável ($F > 0,80$).

2.2.1.5.2 Estabilidade de agregados pelo método da percolação de água

A estabilidade de agregados (EA) foi determinada por meio da estabilidade de percolação em colunas de solo (Figura 3) para cinco amostras por parcela, resultando em 60 amostras por profundidade, 120 por ano agrícola, totalizando 240 amostras. A metodologia para determinação da estabilidade de percolação está descrita em Becher e Kainz (1983) e Auerswald (1995). Inicialmente, uma massa de 10 g de agregados secos ao ar, com diâmetro entre 1-2 mm, foi colocada em um tubo cilíndrico (diâmetro interno de 15 mm e 105 mm de comprimento) com sua extremidade inferior coberta com uma fina malha, sobre a qual foi adicionada areia de tamanho médio (diâmetro de 0,25 a 0,50 mm) até 2 mm de altura. Com os tubos preenchidos com agregados, foi colocada areia média diretamente sobre os agregados até 2 mm de altura. A areia é colocada sobre os agregados com a função de evitar sua ruptura pelo contato direto com a água e no fundo do tubo para que não haja obstrução da saída de

água. Os agregados foram mecanicamente homogeneizados dentro do tubo soltando-o em queda livre por 10 vezes de uma altura de 20 mm sobre uma superfície rígida. Em seguida, cada coluna de agregados foi submetida à percolação de água sob pressão hidrostática constante de 20 hPa durante 10 minutos. O volume de água percolada no tempo é denominado estabilidade de percolação (EP), sendo expressa em mL min^{-1} e considerada como medida da estabilidade de agregados do solo. Para fins de classificação, Mbagwu e Auerswald (1999) dividiram a EP em três faixas: rápida ($> 25,0 \text{ mL min}^{-1}$); moderada ($25-15 \text{ mL min}^{-1}$) e lenta ($< 15 \text{ mL min}^{-1}$), sendo este o critério utilizado para a avaliação da EP entre os tratamentos.

Figura 3 – Parte do aparato instrumental utilizado na determinação da estabilidade de agregados pelo método da percolação água

2.2.1.5.3 Condutividade hidráulica do solo saturado

Para a primeira época (2009) a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) foi obtida para cada amostra pelo método da carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002). As amostras indeformadas foram saturadas e submetidas a uma carga hidráulica variável. Um cilindro sem solo foi fixado sobre o cilindro com solo e ambos são colocados dentro de um recipiente, que é preenchido com água até o transbordamento do cilindro sem solo. Sob a superfície do anel com solo é colocado um medidor que possui duas alturas (h_0 e h_1). Em seguida o orifício na parte inferior do recipiente é aberto para o escoamento da água estabelecendo um fluxo de água através da amostra de solo dentro do recipiente. O

deslocamento de água sobre a amostra de solo, de altura L , no tempo t , corresponde a um deslocamento de água entre duas alturas (h_0 e h_1), e a K_{sat} pode então ser calculada por meio da Eq. 8:

$$K_{sat} = \left(\frac{L}{t} \right) \times \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right) \quad (8)$$

em que L , h_0 e h_1 são alturas dadas em metros (m), t é o tempo em segundos (s) e K_{sat} é a condutividade hidráulica do solo saturada (mm h^{-1}).

Para a segunda época (2010) foi utilizado o permeâmetro de carga constante modelo IAC na determinação da condutividade hidráulica do solo saturado em campo. A K_{sat} foi determinada em 5 pontos por parcela, resultando em 60 medições para a camada 0-5 cm e 60 para a camada 5-10 cm, utilizando uma carga hidráulica de 4 cm.

2.2.1.5.4 Permeabilidade ao ar, índices de continuidade de poros e porosidade bloqueada

Para determinação da permeabilidade ao ar (K_a) as amostras foram divididas em quatro potenciais: -6; -10; -30 e -100 kPa em mesa de tensão e placas porosas em câmaras de pressão. Após atingir o equilíbrio, as amostras foram pesadas para cálculo da umidade volumétrica no potencial referido e em seguida realizou-se a determinação da permeabilidade do solo ao ar através do permeâmetro de carga constante de ar desenvolvido por Figueiredo (2010). O princípio de funcionamento desse aparelho consiste da utilização de amostra de solo em anel volumétrico e com livre fluxo de gases em suas extremidades, sendo submetida a incrementos sucessivos e constantes de taxas de fluxo de ar para gerar distintos gradientes de pressão. A partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita como:

$$q = - \frac{K_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dz} + \rho g \right) \quad (9)$$

sendo, (q) [L/T], K_a [L^2], (P) a pressão de ar [M/LT^2], (z) a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso, (η) a viscosidade do ar [M/LT] ($18,1 \times 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ à 20 °C), (ρ) a densidade do ar [M/L^3] e (g) a aceleração da gravidade [L/T^2].

A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L^3/T] por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) [L^2] e, considerando como desprezível a influência da densidade do ar (SPRINGER et al., 1995), a Eq. (9) foi utilizada para as estimativas da K_a :

$$K_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dP}{dz} \right) \quad (10)$$

Para avaliar a continuidade de poros os valores de permeabilidade (K_a) e porosidade de aeração (ϵ_a) foram relacionados usando a equação de Kozeny-Carman conforme Ahuja et al. (1984):

$$K_a = M \epsilon_a^N \quad (11)$$

onde M e N são constantes empíricas. Os autores consideraram o expoente N como um índice de continuidade de poros, que reflete o aumento da K_a com o aumento da ϵ_a ou o decréscimo da tortuosidade dos poros e área superficial com o aumento da fração de poros disponíveis para o fluxo. A relação de K_a e ϵ_a foi ajustada para uma forma linearizada da Eq. 11:

$$\log K_a = \log M + N \log \epsilon_a \quad (12)$$

Da relação linearizada na Eq. 12 pode se obter três informações indicadas na Figura 4. O slope (N), o intercepto com o eixo $\log K_a$ no qual $\log \epsilon_a = 0$ (M), e o intercepto com o eixo $\log \epsilon_a$ em que $\log K_a = 0$ (ϵ_b). Este intercepto com o eixo $\log \epsilon_a$ (onde $K_a = 1 \mu\text{m}^2$) é denominado de conteúdo de ar limitante e foi proposto por Ball et al. (1988) e Schjønning et al. (2002) como a quantidade de poros de aeração bloqueados no solo que não faz parte do transporte convectivo do ar. Deste modo, ϵ_b é o valor de ϵ_a abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração, e pode ser obtido da Eq. 12 pela Eq. 13:

$$\epsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (13)$$

Figura 4 – Principais características da relação $\log$ (porosidade de aeração, ϵ_a) – $\log$ (permeabilidade ao ar K_a); slope N , intercepto com o eixo $\log(K_a)$, M é o limite da porosidade de aeração, ϵ_b

O índice de continuidade de poros K_l proposto por Groenevelt et al. (1984) também foi calculado com base na relação entre K_a e ε_a :

$$K_l = \frac{K_a}{\varepsilon_a} \quad (14)$$

2.2.1.5.5 Densidade do solo, densidade das partículas, porosidade total e de aeração

Para determinação da densidade do solo (D_s) as amostras foram secadas em estufa à 105°C por 24 h, segundo metodologia descrita por Grossman e Reinsch (2002):

$$D_s = \frac{MS}{VT} \quad (15)$$

em que D_s é a densidade do solo em Mg m^{-3} , MS é a massa de solo seco em Mg e VT é o volume total do anel volumétrico em m^3 .

A densidade das partículas (D_p) foi determinada utilizando-se o picnômetro a gás Hélio modelo ACCUPYC 1330 (Micromeritics Instrument Corporation®). A porosidade total por sua vez foi obtida pela Eq. (16):

$$PT = 1 - \left(\frac{D_s}{D_p} \right) \quad (16)$$

onde PT é a porosidade total em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

A porosidade de aeração (ε_a) foi calculada de acordo com a Eq. 17:

$$\varepsilon_a = PT \cdot \theta \quad (17)$$

onde ε_a é a porosidade de aeração em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e θ é a umidade volumétrica em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

2.2.1.5.6 Distribuição de partículas do solo

As frações granulométricas argila, silte e areia foram determinadas pelo método do densímetro, segundo metodologia descrita em Grossman e Reinsch (2002). A quantidade média de cada fração e a classe textural correspondente são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição das frações granulométricas e classe textural de um Latossolo Vermelho distrófico típico

Profundidade	Argila	Silte	Areia	Classe textural
cm	-----g kg ⁻¹ -----			
0-5	451	116	433	Argilo-arenosa
5-10	470	88	442	Argilo-arenosa

2.2.1.5.7 Carbono orgânico

O carbono orgânico do solo foi determinado pelo método da colorimetria, segundo metodologia descrita em Raij et al. (2001). Para análise do carbono foram utilizadas duas amostras de Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) por parcela, resultando em 24 amostras por camada, 48 amostras por ano agrícola e 96 amostras no total.

2.2.1.5.8 Intervalo hídrico ótimo do solo

A determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) foi feita seguindo a metodologia descrita em Silva et al. (1994). Em cada época avaliada as amostras foram divididas em 10 grupos de 24 amostras. Sendo 12 da camada de 0-5 cm (4 amostras de cada tratamento) e 12 da camada de 5-10 cm (4 amostras de cada tratamento), totalizando 240 amostras por época e 480 amostras no total. As amostras foram lentamente saturadas por 24 h e submetidas aos seguintes potenciais: -0,002; -0,004; -0,006; -0,008 e -0,01 MPa em mesa de tensão; -0,03; -0,07; -0,1; -0,2 e -1,5 MPa em placas porosas (DANE; HOPMANS, 2002). Após atingir o equilíbrio as amostras foram pesadas para determinação da umidade em cada potencial mátrico e imediatamente utilizadas para determinação da resistência à penetração em penetrômetro eletrônico de bancada. Foi feita uma determinação de resistência à penetração por amostra na profundidade de 0,5 até 4,5 cm do topo para o final da amostra. Então, as amostras foram secadas em estufa a 105°C durante 24 h para determinação da densidade do solo e umidade volumétrica (GROSSMAN; REINSCH, 2002). Para determinar o IHO é necessário o conhecimento das curvas de retenção de água e de resistência do solo.

A curva de retenção de água foi determinada pela relação entre umidade volumétrica (θ) e potencial mátrico (ψ) de acordo com Ross et al. (1991) e ajustado por Leão et al. (2005), usando a Eq. (18):

$$\theta = \exp(a + b D_s) \psi^c \quad (18)$$

onde θ é o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); ψ é o potencial de água no solo (MPa); e a , b , e c são parâmetros de ajuste do modelo. A curva de resistência a penetração foi obtida pela umidade volumétrica e densidade do solo usando o modelo proposto por Busscher (1990) [Eq. (19)]:

$$RP = d \theta^e D_s^f \quad (19)$$

onde RP é a resistência a penetração (MPa) e d , e , f são os parâmetros do modelo ajustado.

Para determinação do IHO é necessário calcular os limites superior e inferior de disponibilidade de água no solo. Os limites superiores são o conteúdo de água em $-0,01$ MPa (capacidade de campo) e o correspondente a uma porosidade de aeração 10% (GRABLE; SIEMER, 1968), enquanto os limites inferiores são o conteúdo de água em $-1,5$ MPa (ponto de murcha) e o equivalente a uma resistência a penetração de 2 MPa (TAYLOR et al., 1966). Os valores de conteúdo de água na capacidade de campo (θ_{CC}), porosidade de aeração (θ_{PA}), ponto de murcha (θ_{PM}) e resistência a penetração (θ_{RP}) foram determinados para cada amostra.

Os conteúdos de água na capacidade de campo e ponto de murcha foram calculados usando o modelo de curva de retenção de água da Eq.(18) através das Eq. (20) e (21):

$$\theta_{CC} = \exp(a + bD_s) \times 0,01^c \quad (20)$$

$$\theta_{PM} = \exp(a + bD_s) \times 1,5^c \quad (21)$$

O conteúdo de água no qual a resistência a penetração alcança o valor crítico de 2 MPa foi calculado usando o modelo de curva de resistência da Eq.(19) através da Eq.(22):

$$\theta_{RP} = \left(\frac{RP}{dD_s^f} \right)^{\frac{1}{g}} \quad (22)$$

O conteúdo de água no qual a porosidade de aeração igual a 10% foi calculado com a Eq.(23):

$$\theta_{PA} = \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \cdot 0,1 \quad (23)$$

onde D_p é a densidade de partículas.

Para cada valor de densidade do solo, o IHO foi delimitado pela diferença entre os limites superior e inferior. O limite superior é o menor valor entre o conteúdo de água na capacidade de campo e porosidade de aeração, e o limite inferior é o maior valor entre o conteúdo de água no ponto de murcha e resistência a penetração. A densidade do solo relativa a qual é definida pela relação entre densidade do solo e a máxima densidade do solo (HANKASSON, 1990) foi calculada utilizando os valores de densidade máxima determinados por Silva et al. (2012) para o mesmo experimento. A densidade do solo relativa foi então calculada para posterior correlação com o IHO. O IHO foi calculado utilizando-se um algoritmo no ambiente estatístico SAS, desenvolvido por Leão et al. (2005).

2.2.2 Experimentos Sistemas de preparo e Sistemas de cultivo do solo – EUA

2.2.2.1 Descrição da área experimental

O estudo foi realizado em dois experimentos envolvendo sistemas de preparo do solo (46 anos) e sistemas de cultivo (35 anos) de longa duração localizados na Kansas State University – Agricultural Research Center em Hays, Kansas (Figura 5). A área de estudo apresenta precipitação média anual de 580 mm e altitude de 609 m. A temperatura média anual é de 12°C, enquanto a média mínima é de -9°C e a média máxima é de 34°C.

O experimento sistemas de preparo do solo (38°50'34"N, 99°19'O) foi estabelecido em 1965 em um solo franco siltoso com declividade <1% (Figura 5A). Os tratamentos foram preparo convencional (PC), preparo reduzido (PR) e plantio direto (PD). Eles foram arranjados em um delineamento em blocos casualizados com quatro repetições. A rotação de culturas para este experimento foi trigo/sorgo/pousio (TSP). Esta rotação representa a prática mais comum nesta região de clima seco. Em 1975, as parcelas principais foram divididas em faixas para acomodar a aplicação de nitrogênio na forma de uréia em quatro doses (0, 22, 45 e 67 kg ha⁻¹). Os sistemas de preparo foram as parcelas principais e as doses de nitrogênio as subparcelas. As parcelas principais medem 20,5 x 20,5 m e as subparcelas medem 3,4 x 20,5 m. As parcelas com PC foram preparadas com arado de discos sem aplicação de herbicidas, e as parcelas com PR foram preparadas com 'undercutter' e 'fallow master' com o controle de plantas daninhas quando necessário. Plantas daninhas nas parcelas PD foram controladas com o herbicida glifosato. O espaçamento entrelinhas foi de 19 cm para o trigo e de 75 cm para o sorgo. Neste experimento, os sistemas de preparo foram avaliados somente para duas doses de N (22 e 67 Kg ha⁻¹). Como resultado, tem-se um total de 24 parcelas avaliadas (3 sistemas de preparo x 2 doses de N x 4 repetições). Detalhes adicionais sobre este experimento podem ser obtidos em Thompson e Whitney (2000), McVay et al. (2006) e Blanco-Canqui et al. (2009).

O experimento sistemas de cultivo (38°50'43" N, 99°20'26" O) foi estabelecido em 1976 em um solo franco argilo-siltoso com menos que 1% de declividade (Figura 5B). O solo é profundo e moderadamente permeável. Este experimento consiste de cinco sistemas de cultivo: sorgo-pousio (SP), sorgo contínuo (SS), trigo-sorgo-pousio (TSP), trigo-pousio (TP) e trigo contínuo (TT), manejados sob os sistemas de preparo reduzido (PR) e plantio direto (PD). O delineamento experimental foi em blocos casualizados com parcelas subdivididas com três repetições. Os cinco sistemas de cultivo foram colocados nas parcelas principais e os dois sistemas de preparo nas subparcelas. O tamanho das parcelas principais é de 24,4 x 24,4 m, enquanto o das subparcelas é de 12,2 x 24,4 m. O espaçamento entrelinhas das culturas foi

o mesmo que o do experimento sistemas de preparo. As parcelas com PR foram preparadas com ‘undercutter’ e ‘fallow master’ até a profundidade de aproximadamente 8 cm. O herbicida utilizado para controle das plantas daninhas foi também o mesmo que o utilizado no experimento sistemas de preparo. A fase trigo de cada rotação recebeu cerca de 21 kg ha^{-1} de N na forma de uréia. O presente estudo foi conduzido durante a fase trigo das rotações TSP, TT e TP para ambos os sistemas de preparo, em um total de 18 parcelas (3 sistemas de cultivo x 2 sistemas de preparo x 3 repetições). Mais informações relacionados ao manejo do solo deste experimento podem ser encontradas em Thompson (2001) e Blanco-Canqui et al. (2010).

Figura 5 – Localização geográfica e imagem de satélite do experimento sistemas de preparo do solo (A) e sistemas de cultivo (B) em Hays, Kansas, EUA

2.2.2.2 Precipitação pluviométrica

Os dados de precipitação pluviométrica da área experimental em Hays, Kansas para o ano de 2011 estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 – Dados de precipitação pluviométrica anual da área experimental em Hays, Kansas, EUA para o ano de 2011. Fonte: Agricultural Research Center em Hays (ARCH-KSU)

2.2.2.3 Medições de campo

2.2.2.3.1 Parâmetros de emergência da cultura do trigo

Os parâmetros de emergência do trigo foram obtidos pela contagem do número de plântulas emergidas por metro em cada um dos pontos selecionados para a coleta de amostras de solo indeformadas. A cultura do trigo foi semeada na densidade de 42 sementes por metro e sua emergência ocorreu aos oito dias após a semeadura, passando a ser avaliada diariamente até a estabilização da emergência, a qual ocorreu aos 13 dias. A partir dos dados de emergência (plantas m^{-1}) foram calculadas a taxa de emergência (TE) (Eq. 1) e o índice de velocidade de emergência (IVE) (Eq. 2) conforme descrito no item 2.2.1.2.1.

2.2.2.3.2 Resistência à penetração e conteúdo de água no solo

A resistência a penetração e conteúdo de água no solo foram medidos no inverno de 2011 do primeiro ao décimo terceiro dia após a semeadura do trigo até a profundidade de 10 cm, em quatro pontos por parcela, totalizando 96 pontos no experimento sistemas de preparo e 72 pontos no experimento sistemas de cultivo. O conteúdo de água foi determinado usando o sensor de umidade 10HS (Decagon Devices, EUA) e a resistência à penetração foi medida através de um penetrômetro manual estático (Eijkelkamp, Giesbeek, Holanda).

2.2.2.4 Amostragens de solo

As amostragens foram realizadas em novembro de 2011 durante a fase de cama de semeadura da cultura do trigo. Amostras indeformadas de solo (anéis volumétricos de 5 x 5 cm) foram coletadas entre os 14 e 16 dias após a semeadura do trigo, com um amostrador tipo martelo para as camadas 0-5 e 5-10 cm de profundidade em pontos selecionados aleatoriamente. Foram coletadas quatro amostras por parcela no experimento sistemas de preparo e 5 amostras por parcela no experimento sistemas de cultivo nas linhas de semeadura da cultura do trigo. Dessa forma obteve-se 96 amostras por profundidade e 192 no total para o experimento sistemas de preparo. Para o experimento sistemas de cultivo foram 90 amostras por profundidade e 180 no total. As amostras foram embaladas e acondicionadas em recipientes adequados para o transporte, enviadas para uma câmara fria e mantidas em temperatura de aproximadamente 5°C até serem processadas.

2.2.2.5 Intervalo hídrico ótimo do solo

A determinação do IHO seguiu a metodologia descrita no item 2.2.1.5.8, exceto para a divisão das amostras, as quais foram divididas em cinco grupos de 18 amostras em cada profundidade correspondentes às seguintes tensões: -0,0005 (mesa de tensão); -0,033; -0,1; -0,2 e -1,5 MPa em placas porosas (DANE; HOPMANS, 2002). Após o equilíbrio em cada potencial foi utilizado um penetrômetro manual digital (FGV-200XY, Shimpo, Japão) para determinação da resistência à penetração em triplicata na profundidade de 0,5 até 4,5 cm do topo para o final da amostra. Para o cálculo do IHO o potencial matricial considerado como na capacidade de campo foi o de 0,033 MPa. Os valores de densidade do solo máxima utilizados foram obtidos por Blanco-Canqui et al. (2009) para o experimento sistemas de preparo e Blanco-Canqui et al. (2010) para o experimento sistemas de cultivo.

2.2.3 Análises estatísticas

A análise de variância foi usada para avaliar os efeitos dos tratamentos e épocas de coleta dentro de cada profundidade nos parâmetros de emergência e propriedades do solo. A interação entre épocas de amostragem foi testada e havendo interação significativa foi feito o seu desdobramento. As médias foram comparadas pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Para verificar as relações entre os parâmetros de emergência de milho, soja e

trigo e as propriedades físicas do solo avaliadas foi utilizado o procedimento *Boundary line*. A técnica *boundary line* foi proposta para interpretar dados biológicos, onde uma variável é uma resposta biológica e a outra uma variável independente conforme inicialmente descrito em Webb (1972). Construindo-se gráficos de dispersão entre as variáveis dependente e independente, Webb (1972) propôs que se o conjunto de dados é suficientemente grande a linha conectando os pontos localizados na margem externa retrata a dependência funcional dessas variáveis, sendo a variável independente nesta linha o único fator limitante da variável dependente. Os pontos localizados abaixo da margem superior (externa) refletem a influência de outras variáveis independentes ou da combinação das variáveis que estão limitando a variável dependente (BLANCO-MACIAS et al., 2010). Dessa forma a *boundary line* é uma linha de tendência empiricamente ajustada a esses pontos que formam a linha exterior do gráfico de dispersão (ELLIOTT; de JONG, 1993). Alguns autores têm sugerido, portanto, uma metodologia para a seleção dos *boundary* pontos de forma a reduzir a subjetividade do procedimento *boundary line*. Dessa forma, utilizaremos a metodologia sugerida por Casanova et al. (1999) e adaptada por Vizcayno-Soto e Cote (2004), a qual foi também utilizada e adaptada por diferentes autores (SCHMIDT et al., 2000; CASANOVA et al., 2002; LEWANDOWSKI; SCHMIDT, 2006; BLANCO-MACIAS et al., 2010). O primeiro passo é fazer a remoção de *outliers* dos dados quando detectada sua presença. Em seguida os dados da variável independente são divididos em 10 classes equidistantes, então é selecionado o maior valor da variável dependente de cada classe, como consequência todos os pontos de cada classe são representados por apenas um ponto. Esses valores representam, portanto os *boundary* pontos. Vizcayno-Soto e Cote (2004) sugerem que seja feita também a remoção de *outliers* dos *boundary* pontos conforme necessário. Todavia, sempre que possível utilizar no mínimo seis pontos, conforme recomendado por Lewandowski e Schmidt (2006). O passo final é então ajustar um modelo de regressão que seja mais adequado aos *boundary* pontos. Diferentes funções têm sido testadas para descrever o efeito da variável independente sobre a variável biológica: linear (CASANOVA et al., 2002), exponencial (LEWANDOWSKI; SCHMIDT, 2006), polinomial (VIZCAYNO-SOTO; COTE, 2004; BLANCO-MACIAS et al., 2010) e função assimétrica em forma de S descrita em Van Genuchten (1980), e utilizada por Imhoff et al. (2010) e Otto et al. (2011). Neste estudo foram ajustadas funções lineares e polinomiais quadráticas usando o procedimento PROC REG e PROC NLIN. Todas as análises estatísticas foram desenvolvidas no software SAS (SAS INSTITUTE, 2002).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Experimento Escarificação mecânica e biológica do solo

2.3.1.1 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do milho – 2009

A emergência (plantas m^{-1}) da cultura do milho começou a ser medida no sétimo dia após a semeadura (DAS), sendo finalizada aos 12 DAS quando os valores medidos indicaram uma estabilidade da emergência da cultura (Tabela 2). Os valores médios mostraram que a emergência do milho foi significativamente maior em PDNF somente para o sétimo e oitavo DAS. Para os demais dias avaliados não houve diferença significativa entre os tratamentos. Considerando-se o último dia avaliado, observou-se, porém, que o PDNF apresentou o número de plantas por metro numericamente maior que o PDE e PD. Os valores de taxa de emergência, os quais são calculados de acordo com o número final de plantas emergidas (aos 12 DAS), no entanto, mostraram que esta diferença numérica não apresentou efeito significativo (Figura 7). Todavia, o tratamento PDNF teve uma taxa de emergência cerca de 5% maior que em PDE e PD.

Os valores médios de taxa de emergência foram de 86% para PDNF, 82% para PD e 81% para PDE. Valores de taxa de emergência semelhantes aos dos tratamentos PD e PDE foram encontrados por Reis et al. (2006). Os valores médios do índice de velocidade de emergência (IVE), por sua vez, mostram que em PDNF o IVE foi estatisticamente maior do que o PDE e PD (Figura 7), indicando que o tratamento PDNF propiciou uma maior velocidade de emergência para a cultura do milho. Os valores médios de IVE foram 2,21; 2,25 e 2,55, respectivamente, para PDE, PD e PDNF. Valores de IVE semelhantes ao PDNF foram obtidos por Prado et al. (2001) que encontraram um valor de IVE em torno de 2,60.

O maior IVE encontrado para o PDNF pode ser atribuído à menor cobertura do solo propiciada por este tratamento, quando comparado ao PD e PDE. Enquanto as parcelas PDNF foram cultivadas somente com a cultura do nabo forrageiro, as parcelas PD e PDE foram cultivadas com o consórcio aveia preta + ervilhaca, o que promoveu uma maior cobertura do solo, conforme pôde ser constatado visualmente. Os resultados corroboram com os de Dam et al. (2005) que determinaram uma maior emergência de milho em sistema plantio direto sem resíduos do que com resíduos em um solo franco arenoso no Canadá. Embora não tenha sido medida a temperatura do solo, acredita-se que a menor cobertura do solo em PDNF favoreceu maior aquecimento do solo, e consequentemente, germinação e emergência da cultura do milho, resultando em maior velocidade de emergência do que em PD e PDE. Alguns estudos

demonstraram que a variação da temperatura na fase de cama de semeadura do solo influencia a emergência das culturas (DRURY et al., 1999; FABRIZZI et al., 2005).

Tabela 2 – Valores médios de emergência das plântulas milho (plantas m⁻¹) do sétimo ao décimo segundo dia após a semeadura

DAS	Tratamentos		
	PDE	PD	PDNF
7°	1,20 b	1,83 ab	2,35 a
8°	3,60 b	3,35 b	4,33 a
9°	4,48 a	4,55 a	4,90 a
10°	4,68 a	4,63 a	5,03 a
11°	4,83 a	4,78 a	5,13 a
12°	4,85 a	4,93 a	5,18 a

DAS – dias após semeadura, PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas na mesma linha comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Figura 7 – Valores médios da taxa de emergência (%) e índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura do milho 2009. PDE – plantio direto escarificado, PD – plantio direto, PDNF – plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

O conteúdo de água e a resistência do solo à penetração (RP) foram medidos do primeiro ao décimo segundo DAS da cultura do milho (Tabela 3). Os valores médios de conteúdo de água demonstraram que o solo apresentou alta umidade durante a fase de emergência do milho. O menor conteúdo de água foi de 0,34 m³ m⁻³ para o PDNF e, o maior de 0,47 m³ m⁻³ para o PD. Os altos conteúdos de água obtidos para a cama de semeadura de milho estão coerentes com os dados de precipitação ocorridos na área conforme pode ser visto

na Figura 2. Como resultado dos altos conteúdos de água obtido na área foi também encontrado baixos valores de RP ao longo dos dias avaliados. Outro fator que pode ter contribuído com esses baixos valores de RP pode sido a operação de semeadura da cultura, uma vez que as medições foram tomadas na linha de plantio.

O conteúdo de água e a RP foram significativamente maiores em PD que em PDNF para metade dos dias avaliados (Tabela 3). O tratamento PDE apresentou comportamento intermediário entre PD e PDNF. Apesar das diferenças estatísticas encontradas para o conteúdo de água ao longo dos tratamentos do segundo ao quinto DAS, o valor médio (geral) do conteúdo de água ao longo dos dias avaliados indicou que não houve diferenças significativas entre os tratamentos no oitavo e no décimo segundo DAS. Já o valor médio de RP ao longo dos dias avaliados indicou que o PD foi significativamente maior que o PDNF e estatisticamente igual ao PDE. No entanto, devido à grande proximidade entre os valores médios (geral) de RP (0,68 para PDNF, 0,69 para PDE e 0,71 para PD) esse resultado pode ter pouco significado prático.

Tabela 3 – Valores médios de conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do milho – 2009

DAS	Conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Resistência à penetração (MPa)		
	PDE	PD	PDNF	PDE	PD	PDNF
1º	0,42 a	0,42 a	0,41 a	0,81 a	0,81 a	0,81 a
2º	0,39 ab	0,40 a	0,38 b	0,85 ab	0,85 a	0,84 b
3º	0,39 b	0,42 a	0,39 b	0,59 b	0,64 a	0,58 b
4º	0,36 ab	0,38 a	0,35 b	0,69 ab	0,72 a	0,68 b
5º	0,35 ab	0,36 a	0,34 b	1,26 ab	1,27 a	1,25 b
6º	0,43 a	0,44 a	0,42 a	0,96 a	0,96 a	0,95 a
7º	0,41 a	0,42 a	0,41 a	0,54 a	0,54 a	0,54 a
8º	0,39 ab	0,40 a	0,37 b	1,26 ab	1,31 a	1,23 b
9º	0,44 a	0,44 a	0,43 a	1,08 a	1,08 a	1,08 a
10º	0,42 a	0,44 a	0,44 a	1,20 a	1,22 a	1,22 a
11º	0,46 a	0,47 a	0,46 a	1,01 a	1,00 a	1,00 a
12º	0,42 ab	0,43 a	0,41 b	1,22 b	1,23 a	1,22 b
Média geral	0,41 a	0,42 a	0,40 a	0,69 ab	0,71 a	0,68 b

DAS – dias após semeadura, PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

O maior conteúdo de água em PD em, aproximadamente, metade dos dias avaliados aponta para o efeito da maior cobertura do solo nesse tratamento. Alguns autores também observaram que o sistema PD favorece a retenção de água no solo quando comparado a outros sistemas de manejo (DAM et al., 2005; FABRIZZI et al., 2005). Já os menores valores de

conteúdo de água encontrados em PDNF corroboram com o maior índice de velocidade de emergência obtido neste tratamento. A ausência de diferença significativa no IVE do tratamento PDE em relação ao PD e PDNF demonstra o baixo efeito residual da escarificação mecânica. Diferentes resultados foram obtidos por Chen et al. (2006) que encontraram um maior IVE para a canola em PD subsolado que em PD não subsolado.

2.3.1.2 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura da soja – 2010

A emergência da cultura da soja ocorreu no quinto dia e foi monitorada até sua estabilização no décimo primeiro DAS (Tabela 4). Os valores médios de emergência (plantas m^{-1}) demonstraram que não houve diferenças significativas entre os tratamentos ao longo dos dias avaliados. O número final de plantas foi de 15 para o tratamento PD, seguido pelo PDNF (14 plantas) e PDE (14 plantas). A taxa de emergência e o IVE não apresentaram diferenças significativas (Figura 8). A taxa de emergência média da cultura da soja foi de 77% para o PD, 75% para o PDNF e 74% para o PDE. O IVE seguiu a mesma tendência, apresentando a seguinte ordem: PD>PDNF>PDE. Modolo et al. (2007), avaliando o conteúdo de água e a aplicação de cargas no solo, observaram valores de taxa de emergência para a soja semelhantes aos do presente estudo. Lima et al. (2010) em experimento semelhante também não observaram diferenças significativas para o IVE de soja entre plantio direto e plantio direto escarificado.

Tabela 4 – Valores médios de emergência de plântulas de soja (plantas m^{-1}) do quinto ao décimo primeiro dia a após semeadura

DAS	Tratamentos		
	PDE	PD	PDNF
5°	4	5	4
6°	10	10	10
7°	12	12	12
8°	13	13	13
9°	14	14	14
10°	14	14	14
11°	14	15	14

DAS – dias após semeadura, PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A falta de diferenças significativas para os parâmetros de emergência da soja ao longo dos tratamentos pode ser atribuída à homogeneização da cobertura do solo restabelecida para

a cama de semeadura da soja em relação à cama de semeadura do milho. Após o cultivo do milho, todas as parcelas foram cultivadas com a cultura do trigo, sendo a cultura da soja semeada sobre a palhada do trigo, que criou uma cobertura do solo bastante homogênea. Esta uniformidade, provavelmente evitou o aquecimento diferenciado do solo, resultando em condições similares de temperatura para os três tratamentos e, consequentemente, em ausência de diferenças significativas para os parâmetros de emergência.

Figura 8 – Valores médios da taxa de emergência (%) e índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura da soja – 2010. PDE – plantio direto escarificado, PD – plantio direto, PDNF – plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

Os resultados indicaram que o efeito da cultura do nabo forrageiro em aumentar a velocidade de emergência das culturas foi temporário, uma vez que persistiu somente até a cama de semeadura do milho, não apresentando efeitos para a cama de semeadura da soja. Outro fator é que o aumento da velocidade de emergência ocorrido no milho, provavelmente, relacionou-se com a menor cobertura do solo propiciada pelo cultivo do nabo forrageiro, do que propriamente com a cultura do nabo forrageiro em si, uma vez que qualquer cultura que promovesse menor cobertura do solo poderia favorecer o aquecimento do mesmo. Com relação aos resultados do PDE a ausência de diferenças significativas entre tratamentos corrobora com os encontrados para a cama de semeadura do milho. Neste estudo, a prática da escarificação mecânica não promoveu efeitos sobre a emergência de milho e da soja tanto no curto (6 meses) quanto no médio prazo (18 meses).

Os valores médios de conteúdo de água e RP foram monitorados no campo do primeiro ao décimo primeiro DAS da cultura da soja (Tabela 5). De forma contrária ao ocorrido na cama de semeadura de milho, os teores de água no solo foram baixos durante a fase de emergência da soja, o que pode ter sido reflexo da baixa precipitação ocorrida neste período (Figura 2). Como consequência, foram obtidos altos valores de resistência do solo à penetração (>2 MPa) para todos os tratamentos (Tabela 5).

Tabela 5 – Valores médios de conteúdo de água e resistência do solo à penetração da cama de semeadura da cultura da soja – 2010

DAS	Conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Resistência à penetração (MPa)		
	PDE	PD	PDNF	PDE	PD	PDNF
1°	0,23 a	0,23 a	0,22 a	1,79 a	1,77 a	1,73 a
2°	0,22 a	0,23 a	0,22 a	2,25 a	2,41 a	2,23 a
3°	0,19 a	0,20 a	0,19 a	2,18 a	2,22 a	2,15 a
4°	0,18 a	0,18 a	0,17 a	2,36a	2,36 a	2,31 a
5°	0,17 a	0,18 a	0,16 b	2,74 a	2,77 a	2,69 b
6°	0,18 a	0,19 a	0,16 b	2,73 a	2,80 a	2,57 b
7°	0,20 a	0,20 a	0,17 b	2,38 a	2,40 a	2,24 b
8°	0,20 a	0,21 a	0,18 b	2,13a	2,14 a	2,01 b
9°	0,23 a	0,23 a	0,22 a	2,04 a	2,08 a	2,02 a
10°	0,20 a	0,21 a	0,20 a	2,37 a	2,41 a	2,35 a
11°	0,19 a	0,18 a	0,17 a	2,51 a	2,49 a	2,45 a
Média geral	0,20 a	0,20 a	0,19 b	2,34 a	2,37 a	2,18 b

DAS – dias após semeadura, PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Dos onze dias avaliados, para apenas quatro dias os valores médios de conteúdo de água foram significativamente maiores em PD e PDE do que PDNF. Todavia, o valor médio geral seguiu tendência similar, indicando que, tanto conteúdo de água quanto a RP foram maiores em PD e PDE do que em PDNF. Porém, para o conteúdo de água esses resultados devem ser vistos com cuidado, devido à proximidade entre os valores médios dos tratamentos. Mesmo com o restabelecimento da cobertura vegetal pelo cultivo da cultura do trigo, esse resultado evidencia que as parcelas cultivadas com nabo forrageiro não apresentaram cobertura do solo suficiente para manter os mesmo níveis de umidade do solo que os outros tratamentos. A presença de significância somente para a segunda época avaliada pode ser devido aos menores conteúdos de água obtidos nesta época comparada à primeira época. Geralmente o solo mais seco apresenta maior variabilidade do conteúdo de água do que quando mais úmido (ASSIS et al., 2009).

A resistência do solo à penetração, de forma semelhante à avaliação realizada na cultura do milho, foi maior no tratamento PD e PDE do quinto ao oitavo DAS e também para o valor médio geral de RP. Porém, para a fase de semeadura da soja, os valores de resistência foram superiores ao da primeira época, devido à baixa umidade do solo. A menor RP encontrada para o PDNF indica um possível efeito do nabo forrageiro em aumentar a porosidade do solo e, conseqüentemente, em reduzir a RP, conforme também relatado por Angers e Caron (1998). Embora a cama de semeadura da soja tenha apresentado baixos teores de água no solo e elevada RP, os valores obtidos para a taxa de emergência indicam que estes fatores não afetaram negativamente a germinação e emergência das plântulas de soja.

2.3.1.3 Resistência tênsil de agregados e friabilidade do solo

Na primeira época avaliada a resistência tênsil (RT) e a friabilidade (F) apresentaram elevados coeficientes de variação nas duas camadas de solo, com valores superiores a 30% (Tabela 6). A utilização de agregados menores que os usuais na determinação da RT pode ter favorecido esse aumento da variabilidade assim como pela dificuldade de se definir a posição mais estável dos agregados para a execução do teste de resistência. Todavia, elevados coeficientes de variação para RT tem sido constantemente relatados na literatura (BARTOLI et al., 1992; TORMENA et al., 2008a). Isto sugere que a alta variabilidade pode ser uma característica intrínseca da RT, uma vez que as variações nas formas dos agregados e na composição do solo são, segundo Imhoff et al. (2002), os principais fatores que contribuem para uma alta variação desta propriedade.

O menor valor de RT foi encontrado para o PD em 0-5 cm (24,41 kPa) e o maior para o PDE em 5 -10 cm (198,89 kPa). A camada 5-10 cm apresentou maiores valores de RT que a camada 0-5 cm. Isto pode estar diretamente associado com a redução do carbono orgânico da camada 0-5 para a de 5-10 cm (Tabela 8). Uma redução nos valores de RT com o aumento do teor de carbono orgânico do solo foi também encontrado por Blanco-Canqui et al. (2005) e Abid e Lal (2009). Diferentes resultados foram demonstrados por Imhoff et al. (2002) e Guimarães et al. (2009) que encontraram uma positiva e significativa correlação entre RT e carbono orgânico. Outro fator contribuindo para a elevada RT na camada 5-10 cm é a resistência do solo à penetração, já que a partir dos 5 cm tem sido comumente encontrada em plantio direto, camada de solo mais compactada (PIERCE et al., 1994; HAMILTON-MANNS et al., 2002). O teor médio de água residual por ocasião da medida de resistência tênsil não variou significativamente entre os tratamentos e profundidades, indicando que não houve

influência da umidade dos agregados nos valores de RT e F. Resultados semelhantes foram obtidos por Tormena et al. (2008b).

Tabela 6 – Estatística descritiva para resistência tnsil, friabilidade, teor de gua residual, estabilidade de agregados e carbono orgnico do solo para cama de semeadura da cultura do milho – 2009

Tratamento	Profundidade (cm)	Mnimo	Mdia	Mximo	DP	CV (%)
Resistncia tnsil (kPa)						
PDE	0-5	34,12	87,38 a	178,12	31,83	36,42
PD	0-5	24,41	84,35 a	173,37	28,08	33,29
PDNF	0-5	36,46	86,74 a	177,21	31,08	35,83
PDE	5-10	59,83	95,36 a	198,89	29,52	30,95
PD	5-10	49,43	101,20 b	193,76	30,94	30,57
PDNF	5-10	45,77	105,38 b	193,84	32,98	31,29
Friabilidade						
PDE	0-5	0,13	0,45 a	0,93	0,19	43,06
PD	0-5	0,13	0,44 a	1,03	0,18	40,72
PDNF	0-5	0,07	0,45 a	0,97	0,21	46,66
PDE	5-10	0,07	0,46 a	0,92	0,19	42,50
PD	5-10	0,17	0,39 a	0,72	0,13	34,00
PDNF	5-10	0,15	0,43 a	0,99	0,19	43,99
Teor de gua residual (kg kg ⁻¹)						
PDE	0-5	0,02	0,04	0,10	0,02	46,36
PD	0-5	0,01	0,04	0,10	0,02	50,76
PDNF	0-5	0,01	0,04	0,07	0,02	45,65
PDE	5-10	0,01	0,04	0,08	0,02	44,78
PD	5-10	0,03	0,04	0,06	0,01	26,31
PDNF	5-10	0,02	0,05	0,09	0,02	38,49

PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; DP- desvio padro; CV- coeficiente de variao.

No segundo perodo avaliado, a cama de semeadura da cultura da soja apresentou valores de RT com menor variabilidade, conforme observado pelos CVs (Tabela 7), porm ainda considerados elevados, variando desde 18,93 at 30,05%. Essa reduo da variabilidade na RT, comparada primeira poca, pode ter ocorrido em funo do tempo de aplicao dos tratamentos (18 meses). A friabilidade, contudo, apresentou a mesma tendncia do perodo anterior, com elevados valores de CV. Da mesma forma que aos seis primeiros meses, o aumento da RT em profundidade pode ser explicado pela reduo do carbono orgnico, conforme observado por Blanco-Canqui e Lal (2007). A similaridade nos teores de gua residual entre os tratamentos mostra, novamente, ausncia de influncia da umidade nos valores de RT e F.

Tabela 7 – Estatística descritiva para resistência tênsil, friabilidade, teor de água residual do solo para cama de semeadura da cultura da soja – 2010

Tratamento	Profundidade (cm)	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV (%)
Resistência tênsil (kPa)						
PDE	0-5	44,51	86,30 a	114,13	16,34	18,93
PD	0-5	48,55	88,00 a	146,14	25,40	28,86
PDNF	0-5	52,16	87,65 a	147,97	20,95	23,90
PDE	5-10	44,96	100,75 b	149,76	23,29	23,11
PD	5-10	64,71	100,47 b	174,05	25,04	24,92
PDNF	5-10	54,72	97,52 b	177,08	29,31	30,05
Friabilidade						
PDE	0-5	0,12	0,40 a	0,90	0,16	43,38
PD	0-5	0,08	0,35 a	0,60	0,13	38,12
PDNF	0-5	0,14	0,35 a	0,70	0,14	41,16
PDE	5-10	0,12	0,42 b	0,93	0,20	47,26
PD	5-10	0,10	0,37 b	0,81	0,16	42,19
PDNF	5-10	0,09	0,37 b	0,62	0,14	37,37
Teor de água residual (kg kg⁻¹)						
PDE	0-5	0,01	0,06	0,12	0,03	55,24
PD	0-5	0,01	0,06	0,10	0,03	45,97
PDNF	0-5	0,02	0,06	0,12	0,03	48,13
PDE	5-10	0,01	0,05	0,10	0,03	53,84
PD	5-10	0,01	0,05	0,11	0,03	58,52
PDNF	5-10	0,02	0,05	0,12	0,02	47,14

PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação.

A resistência tênsil dos agregados não apresentou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos e épocas de amostragem para as duas camadas de solo avaliadas (Figura 9). Todavia, o PD e PDNF em 2009 tiveram RT estatisticamente maior em 5-10 cm comparado com 0-5 cm (Tabela 6). A ausência de diferença estatística entre as camadas de solo para o PDE pode ser atribuída a uma possível homogeneização da camada de 0-10 cm com o processo de escarificação mecânica. Em 2010, a RT em todos os tratamentos foi significativamente maior em 5-10 cm que em 0-5 cm de profundidade (Tabela 7). A RT dos agregados tem demonstrado ser um indicador sensível das condições físicas em solos cultivados no sistema plantio direto e conduzidos sob diferentes manejos, conforme demonstrado por Tormena et al. (2008b), Blanco-Canqui e Lal (2007) e Bavo et al. (2010). Enquanto os primeiros utilizaram agregados com diâmetro variando de 12,5 a 19,0 mm, Blanco-Canqui e Lal (2007) utilizaram agregados com diâmetro de 4,75 a 8 mm. Os resultados sugerem que a diminuição do tamanho de agregados utilizados na determinação da RT implica também em uma redução da sensibilidade desta propriedade do solo em distinguir os sistemas de manejo aplicados. Isso se deve ao fato de que com a redução do tamanho dos

agregados ocorre também uma redução nos seus planos de fraqueza uma vez que os agregados menores são fragmentos dos agregados maiores. Sendo os agregados maiores provenientes de diferentes mecanismos, eles tendem a refletir melhor as condições de manejo que agregados menores, já que estes últimos são exclusivamente formados dos maiores (DEXTER, 1988; WATTS; DEXTER, 1998). A ausência de significância da RT entre épocas de amostragem aponta para uma possível estabilidade temporal dessa propriedade, indicando que os métodos mecânicos e biológicos de descompactação não interferiram nem a curto (6 meses) nem a médio prazo (18 meses) na RT. Todavia, a utilização de agregados de 2 a 4 mm pode ter influenciado negativamente a detecção de diferenças em RT ao longo dos manejos propostos, uma vez que práticas mecânicas e biológicas de escarificação parecem não afetar a ruptura numa escala de tamanho de agregados tão diminuta.

A friabilidade do solo, de forma semelhante à RT, não apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos para as duas camadas de solo (Figura 9). Em relação às épocas de amostragem houve significância somente para PD e PDNF em 0-5 cm. A predominante ausência de significância em F está coerente com a ausência encontrada em RT. De acordo com a classificação proposta por Imhoff et al. (2002) todos os tratamentos foram classificados como friáveis em todas as épocas de amostragem e profundidades, ou seja, apresentaram uma condição física na cama de semeadura adequada para receber as sementes e proporcionar condições adequadas ao desenvolvimento inicial das plântulas. A ausência de diferenças significativas entre os tratamentos para as duas épocas avaliadas indica que a RT e F não foram sensíveis em diferenciar os efeitos da escarificação mecânica e da biológica tanto no curto (seis meses) como no médio prazo (dezoito meses). Resultados semelhantes foram encontrados por Tormena et al. (2008b) que concluíram que a escarificação mecânica poderia então ser substituída pela rotação de culturas (PD) uma vez que esta produziria uma condição física de cama de semeadura mais favorável ao desenvolvimento das plantas.

Figura 9 – Valores médios de resistência tênsil (RT) e friabilidade (F) para a cama de semeadura da cultura do milho 2009 e da soja 2010. PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre tratamentos e maiúsculas iguais entre épocas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

Outro fator que pode ter contribuído para a ausência de diferenças significativas de RT e F nas duas avaliações é a operação de semeadura. Como o foco das avaliações é a condição física da cama de semeadura, a operação de semeadura exerce grande influência sobre os tratamentos, pois promove certa homogeneização da camada de 0-10 cm, que é justamente a profundidade de trabalho da semeadora. Entretanto Bavoso et al. (2010) encontraram maiores valores de RT em plantio direto, do que em plantio direto subsolado e submetido a outros sistemas de preparo convencionais. No entanto, não existe na literatura um consenso sobre o fato do sistema plantio direto apresentar maiores valores de RT do que sistemas de manejo

com algum tipo de preparo. Abid e Lal (2009), por exemplo, encontraram menores valores de RT em sistema plantio direto comparado ao sistema convencional de preparo do solo.

2.3.1.4 Estabilidade de agregados pela percolação de água e carbono orgânico do solo

A estabilidade de agregados por percolação (EA) e o teor de carbono orgânico do solo apresentaram menores coeficientes de variação quando comparados com a RT e F (Tabela 8). Porém, no PDE os maiores valores de CV da EA para as duas camadas de solo em relação ao PD e PDNF, provavelmente seja reflexo da escarificação mecânica, que pode ter resultado em agregados de tamanhos diferenciados. O mesmo, entretanto, não pôde ser observado para o carbono orgânico, que apresentou na camada de 0-5 cm do PD o maior valor de CV. Os baixos valores de CV encontrados neste estudo para EA, no entanto, foram diferentes daqueles relatados por Siegrist et al. (1998), que obtiveram CV variando 18,9 até 50,4% utilizando o mesmo método de determinação de EA. Diferentemente da RT, não houve aumento da EA da camada 0-5 para 5-10 cm. Para as duas camadas avaliadas foram obtidos resultados semelhantes de percolação de água. O PDE, no entanto, comparado ao PD e PDNF apresentou os menores valores de mínimo (11,12 mL min⁻¹) e máximo (35,41 mL min⁻¹), confirmando o efeito negativo da escarificação mecânica sobre a EA do solo, em virtude da fragmentação dos agregados do solo promovida por esta operação.

Tabela 8 – Estatística descritiva para estabilidade de agregados pela percolação e carbono orgânico do solo para cama de semeadura da cultura do milho – 2009

Tratamento	Profundidade (cm)	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV (%)
Estabilidade de agregados (mL min ⁻¹)						
PDE	0-5	11,12	26,81 a	35,41	7,01	26,16
PD	0-5	23,64	34,81 a	43,11	5,36	15,00
PDNF	0-5	23,87	30,98 a	38,57	4,17	13,46
PDE	5-10	18,24	28,41 a	40,13	6,22	21,90
PD	5-10	25,11	33,57 a	41,46	5,51	16,42
PDNF	5-10	23,26	30,43 a	41,77	5,48	18,02
Carbono orgânico (%)						
PDE	0-5	2,00	2,34 a	2,90	0,27	12,06
PD	0-5	1,60	2,09 a	2,70	0,39	23,65
PDNF	0-5	1,80	2,05 a	2,50	0,23	12,38
PDE	5-10	1,40	1,59 b	1,90	0,16	14,08
PD	5-10	1,50	1,69 b	2,00	0,18	12,71
PDNF	5-10	1,30	1,63 b	1,90	0,23	4,54

PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação.

Os valores de CV da EA da cama de semeadura de soja indicam um ligeiro aumento na variabilidade dos dados em relação à primeira avaliação, com o PDNF em 0-5 cm e o PDE em 5-10 cm apresentando os maiores valores de CV (Tabela 9). Os valores médios de EA indicam similaridade para a camada 0-5 cm entre as duas épocas de avaliação e uma redução da EA para a camada 5-10 cm da primeira para a segunda avaliação. Devido ao fato desta redução ter ocorrido nos três tratamentos, acredita-se que a mesma não esteja relacionada com os aspectos da escarificação mecânica e biológica, podendo estar relacionada ao fato do cultivo do trigo ter propiciado uma uniformização na área. Diferentemente da primeira avaliação, houve uma redução da EA em profundidade, a qual pode ser relacionada também com a diminuição do carbono orgânico em profundidade. Dentre todos os atributos medidos, o carbono orgânico foi o que apresentou menor variabilidade, com CV's menores que 10% (Tabela 9). Baixos CV's para o carbono orgânico foram observados por Siegrist et al. (1998) e Guimarães et al. (2009). Pode-se observar que houve uma diminuição dos teores de carbono orgânico da primeira para a segunda avaliação, principalmente na camada superficial. Devido essa tendência ter ocorrido em todos os tratamentos, acredita-se que variações nos teores de carbono orgânico ao longo do tempo sejam reflexo de diferenças no regime de chuvas de um ano para outro, bem como da sequência de diferentes culturas que compõe a rotação. Na primeira avaliação da cama de semeadura do milho, foi cultivada no outono/inverno aveia preta em consórcio com ervilhaca; já na segunda avaliação da cama de semeadura da cultura da soja, havia sido cultivado trigo no inverno.

Tabela 9 – Estatística descritiva para estabilidade de agregados e carbono orgânico do solo para cama de semeadura da cultura da soja – 2010

Tratamento	Profundidade (cm)	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV (%)
Estabilidade de agregados (mL min⁻¹)						
PDE	0-5	18,56	27,87 a	37,06	5,17	18,55
PD	0-5	19,23	27,15 a	37,67	5,10	18,77
PDNF	0-5	16,20	33,18 a	50,86	10,01	30,17
PDE	5-10	15,23	22,50 b	36,74	6,77	30,08
PD	5-10	16,24	22,16 b	29,73	3,45	15,58
PDNF	5-10	14,70	21,78 b	30,03	3,78	17,36
Carbono orgânico (%)						
PDE	0-5	1,59	1,70 a	1,85	0,09	3,81
PD	0-5	1,61	1,70 a	1,76	0,05	3,35
PDNF	0-5	1,63	1,71 a	1,83	0,07	5,22
PDE	5-10	1,28	1,46 b	1,59	0,11	6,11
PD	5-10	1,46	1,63 b	1,63	0,07	3,29
PDNF	5-10	1,28	1,57 b	1,57	0,10	9,46

PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação.

A estabilidade de agregados em 2009 foi estatisticamente ($p < 0,05$) menor em PDE que em PD e PDNF para a camada 0-5 cm (Figura 10). Na camada de 5-10 cm o PD foi estatisticamente igual ao PDNF e maior que o PDE. A EA em PDE foi, respectivamente, 23 e 13% menor que em PD e PDNF para a camada 0-5 cm, enquanto na camada 5-10 cm esses valores diminuíram para 15 e 7%, respectivamente. A operação de escarificação mecânica provocou o rompimento da estrutura do solo e resultou em diminuição da EA. Já a introdução do nabo forrageiro no sistema de rotação de culturas deixou o solo, no mínimo, com as mesmas condições de estabilidade de agregados que o PD. Os resultados da EA indicam que a escarificação mecânica resultou numa perda de qualidade estrutural para a cama de semeadura do solo avaliada seis meses após a realização desta operação. Vakali et al. (2011) utilizando a mesma metodologia na avaliação de EA, observaram que sistemas de manejo com algum tipo de mobilização do solo resultaram em menor EA que os sistemas sem mobilização. Riley et al. (2008) relatam que a mobilização do solo torna-o mais instável e facilmente degradável. A diferença observada em termos de estabilidade de percolação entre os tratamentos pode ainda ser atribuída a uma estrutura mais estável, biologicamente mais ativa e com atividade radicular das culturas envolvidas na rotação, para os tratamentos PD e PDNF.

Seguindo a classificação de EA via percolação proposto por Mbagwu e Auerswald (1999), todos os tratamentos e profundidades foram classificados como de rápida percolação. Isso significa que, embora a escarificação mecânica tenha resultado em efeitos significativos sobre a EA, estes não foram suficientes para mudar a classe de percolação do solo avaliado. Uma rápida percolação indica uma boa qualidade estrutural, uma vez que é a classificação encontrada para solos sob floresta, conforme destacaram Mbagwu e Auerswald (1999).

A estabilidade de agregados em 2010, por sua vez, foi significativamente ($p < 0,05$) maior em PDNF na camada 0-5 cm, indicando que os efeitos benéficos da descompactação biológica, ao contrário da escarificação mecânica, tendem a aparecer no médio prazo (18 meses). O PDNF apresentou uma EA cerca de 16% maior que no PD e PDE. Para a camada de 5-10 cm de profundidade não houve diferença estatística. Abreu et al. (2004) utilizando outros indicadores físicos do solo, também observaram que os efeitos da escarificação biológica (crotalaria) tendem a aparecer no médio prazo. O PDE e PD apresentaram valores estatisticamente iguais de EA, sugerindo que, após 18 meses da escarificação mecânica, houve uma reconsolidação da estrutura do solo, onde o PDE teve os mesmos valores de EA do tratamento PD. De maneira semelhante, Nicoloso et al. (2008) também observaram pela porosidade total, macro e microporosidade, e infiltração de água que a escarificação mecânica apresentou um baixo efeito residual e ainda concluíram que a escarificação biológica com o

uso do nabo forrageiro resultou em aumento da macroporosidade, redução da resistência a penetração e aumento da infiltração de água no solo. De acordo com as classes de estabilidade de percolação adotadas neste estudo, todos os tratamentos na camada 0-5 cm tiveram uma rápida percolação, enquanto para a camada 5-10 cm, a percolação foi classificada como moderada. Isso indica uma diminuição da EA da camada 5-10 cm em relação à primeira avaliação. Todavia, para as duas camadas os valores de EA ficaram bem acima dos valores considerados críticos ($<15 \text{ mL min}^{-1}$) (MBAGWU; AUERSWALD, 1999).

A estabilidade de agregados na camada de 0-5 cm apresentou uma redução de 2009 para 2010 somente para o PD (Figura 10). Os tratamentos PDE e PDNF mostraram que a EA é temporalmente estável, mantendo seus valores significativamente iguais entre as épocas avaliadas. Isso pode ser atribuído ao efeito conjugado da operação de semeadura e escarificação mecânica e biológica dentro de cada tratamento. Já na camada de 5-10 cm houve diferença significativa entre as épocas amostradas para todos os tratamentos, mostrando uma redução da EA de um ano para outro, a qual deve estar relacionada aos fatores de manejo da área, uma vez que não houve diferença estatística no carbono orgânico entre as épocas avaliadas para esta profundidade (Figura 10).

Em relação aos teores de carbono orgânico total, não foram observadas diferenças entre os tratamentos e épocas avaliadas para as duas camadas estudadas (Figura 10). Este fato pode estar associado com o tempo de implantação do sistema de plantio direto na área (18 anos) e ao efeito de tratamentos pouco contrastantes que resultaram em uma homogeneização do carbono orgânico do solo de modo similar aos resultados obtidos por Tormena et al. (2008 a). Bavoso et al. (2010) após três anos de avaliações também não observaram diferenças significativas no teor de carbono orgânico entre sistemas de manejo e uso do solo.

A camada 0-5 cm apresentou teores de carbono significativamente maiores que a camada 5-10 cm (Tabelas 8 e 9). Isso reflete o efeito continuado da deposição de resíduos sobre a superfície do solo, proporcionado pelo sistema de manejo, que inclui a manutenção dos resíduos culturais e a utilização de plantas de cobertura no sistema de rotação de culturas e favorece a criação de um gradiente de carbono orgânico no solo, que tende a diminuir com o aumento da profundidade. Para a camada de 0-5 cm houve redução significativa do teor de carbono orgânico de 2009 para 2010. Como todos os tratamentos apresentaram essa redução, isso provavelmente está relacionado a outros fatores, como variação na temperatura e mudanças no regime de chuvas de um ano para outro. Em 5-10 cm não houve diferenças significativas nos teores de carbono orgânico entre 2009 e 2010 para PDE e PDNF, isso

aponta para uma estabilidade temporal deste atributo, a qual pode estar relacionada com o possível efeito residual da escarificação mecânica e biológica do solo.

Figura 10 – Valores médios de estabilidade de agregados (EA) e carbono orgânico para a cama de semeadura da cultura do milho 2009 e da soja 2010. PDE- plantio direto escarificado; PDC- plantio direto consolidado; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre tratamentos e maiúsculas iguais entre profundidades não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

2.3.1.5 Condutividade hidráulica do solo saturado

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) apresentou alta variabilidade na primeira época avaliada, desde 1,25 mm h⁻¹ para o PDE em 5-10 cm até 1354,81 mm h⁻¹ para o PDE em 0-5 cm (Tabela 10). Esta alta variabilidade resultou em elevados coeficientes de

variação (CV): 120,96% até 175,67%. Para a segunda época avaliada houve uma redução dos CV's, que variaram de 45,88 a 109,18%. Nesta segunda época, a Ksat foi medida no campo, indicando que sua determinação em campo proporcionou uma menor variabilidade do que em laboratório. Todavia, de acordo com a classificação de CV proposta por Warrick e Nielsen (1980), para ambas as épocas a Ksat apresentou uma variabilidade considerada muito alta.

A condutividade hidráulica do solo saturado é considerada uma das propriedades do solo de maior variabilidade espacial, como pôde ser observado pelos elevados CV's encontrados por alguns autores (ABREU et al., 2003; BOSCH; WEST, 1998; REHFELDT et al., 1992). Enquanto Abreu et al. (2003) encontraram um CV da Ksat de 62,7% para um solo de textura franco arenosa, Bosh e West (1998) observaram uma variação do CV da Ksat desde 26 até 218% para diferentes solos e profundidades nos EUA.

Tabela 10 – Estatística descritiva para a condutividade hidráulica do solo saturado (mm h^{-1}) para cama de semeadura da cultura do milho – 2009 e soja – 2010

Tratamento	Profundidade (cm)	Mínimo	Média	Máximo	DP	CV (%)
Cama de semeadura Milho - 2009						
PDE	0-5	2,43	149,11	1354,81	261,94	175,67
PD	0-5	2,13	130,06	901,12	186,86	143,68
PDNF	0-5	2,69	110,96	665,09	142,04	128,01
PDE	5-10	1,25	16,48	78,96	19,94	120,96
PD	5-10	1,84	8,66	82,60	14,35	165,59
PDNF	5-10	2,02	8,38	66,13	11,56	137,97
Cama de semeadura Soja - 2010						
PDE	0-5	165,29	694,89	1309,17	307,14	44,20
PD	0-5	261,83	837,42	1322,50	392,97	46,93
PDNF	0-5	196,38	716,58	1309,17	328,93	45,90
PDE	5-10	21,82	104,95	436,25	114,59	109,18
PD	5-10	21,82	94,32	286,54	76,99	81,63
PDNF	5-10	33,06	87,05	154,29	39,44	45,88

PDE- plantio direto escarificado; PDC- plantio direto consolidado; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação.

Os dados de Ksat foram transformados para a forma logarítmica com a finalidade de obter uma distribuição mais próxima possível da normalidade e em seguida submetidos à análise de variância e teste de média. A Ksat não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos nas duas épocas avaliadas para a camada 0-5 cm (Figura 11). Uma possível explicação para este resultado é que a operação de semeadura provavelmente tenha causado uma homogeneização da estrutura do solo nesta camada, resultando em valores de Ksat semelhantes para todos os tratamentos. Para a camada 5-10 cm na primeira época avaliada (2009), o PDE apresentou Ksat significativamente maior que PD e PDNF. A Ksat em PDE

foi cerca de 1,4 vezes maior do que em PD e PDNF. Isso aponta para um efeito positivo da escarificação mecânica em facilitar a condução de água no solo, resultando em maior Ksat aos seis meses após a aplicação desta prática. Wu et al. (1992) relataram que a escarificação mecânica promove um aumento na macroporosidade do solo influenciando dessa forma no seu movimento de água.

Para a segunda época avaliada não houve diferenças na Ksat entre os tratamentos para a camada 5-10 cm (Figura 11). Este resultado indica que os efeitos da escarificação mecânica sobre a Ksat não perduraram até os 18 meses após sua aplicação. Resultados semelhantes foram encontrados por Tavares Filho et al. (2006) que observaram um aumento da Ksat em plantio direto logo após escarificação mecânica em comparação ao plantio direto contínuo. Contudo após um e dois anos da escarificação mecânica estes autores não observaram mais diferenças na Ksat entre o plantio direto escarificado e o contínuo. Resultados diferentes, no entanto, foram obtidos por Vieira e Klein (2007) que avaliaram a Ksat 24 meses após a escarificação mecânica e obtiveram maiores valores para o PDE que para o PD para a mesma classe de solo do presente estudo, concluindo que esta prática melhorou as condições do solo apresentando um efeito residual de pelo menos 2 anos. No entanto, Drury et al. (2003) e Blanco-Canqui et al. (2004) não observaram diferenças significativas na Ksat ao longo dos tratamentos PD, PDE e PC para a camada 0-10 cm.

A escarificação biológica pelo cultivo do nabo forrageiro não apresentou efeitos significativos sobre a Ksat nem no curto (seis meses) nem no médio prazo (18 meses). Essa ausência de efeitos do nabo forrageiro pode ser atribuída à alta precipitação ocorrida em 2009, a qual pode ter favorecido o rearranjo do espaço poroso e reconsolidação da estrutura do solo. Entretanto, Nicoloso et al. (2008) encontraram uma melhoria na infiltração de água no solo nove meses após aplicação da escarificação biológica pelo nabo forrageiro em um Latossolo, concluindo que a mesma foi eficiente em aumentar a macroporosidade do solo. Também Abreu et al. (2004) utilizando a crotalaria como escarificador biológico em um Argissolo observaram uma maior Ksat que no tratamento PDE e PD contínuo. Para eles a escarificação biológica foi mais eficiente na criação de poros condutores de água que a escarificação mecânica.

Devido a Ksat ter sido determinada por métodos diferentes não foi realizada a comparação estatística entre épocas. Acredita-se que a grande diferença observada entre os anos (cerca de duas vezes maior em 2010 que em 2009) seja devido aos diferentes métodos de determinação da Ksat em cada época, a qual foi determinada pelo método da carga decrescente em laboratório na primeira época (2009) e pelo permeâmetro de carga constante

no campo para a segunda época (2010). Dessa forma, os resultados indicam que a determinação em campo possa ter causado uma superestimativa da Ksat, uma vez que estudos que determinaram a Ksat, tanto em laboratório (VIEIRA; KLEIN, 2007; BLANCO-CANQUI et al., 2010) quanto em campo (ABREU et al., 2003; SILVA et al., 2009; SO et al., 2009) apresentaram valores de Ksat mais próximos aos encontrados neste estudo na primeira época avaliada.

Figura 11 – Valores médios da condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) para a cama de semeadura de milho-2009 e soja-2010. PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Médias seguidas de letras minúsculas iguais entre tratamentos e maiúsculas iguais entre épocas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

2.3.1.6 Permeabilidade ao ar

Os dados de permeabilidade ao ar foram submetidos ao teste de normalidade de acordo com Shapiro e Wilk (1965). Os dados apresentaram uma distribuição não normal, devido a isso os valores de permeabilidade ao ar foram transformados para a forma logarítmica com vistas a obter uma distribuição a mais próxima possível da normalidade. Os valores médios de $\log K_a$ para todos os potenciais utilizados estão apresentados na Tabela 11.

Houve interação significativa entre tratamentos e épocas para a permeabilidade ao ar. A K_a apresentou efeito significativo entre os tratamentos somente para o potencial -6 kPa na camada 0-5 cm na primeira época avaliada (2009) e no potencial de -30 kPa na camada 0-5 cm na segunda época avaliada (2010). Em -6 kPa, o PDNF teve permeabilidade ao ar significativamente maior que PDE e PD, enquanto em -30 kPa o PDNF e PDE foram maiores

que o PD. Estes resultados indicam o efeito do cultivo do nabo forrageiro em aumentar a macroporosidade do solo, resultando em maior permeabilidade ao ar, como também relatado por Cresswell e Kirkegaard (1995). Resultados semelhantes aos do presente estudo foram obtidos por Silveira Junior (2012) quando avaliaram a permeabilidade ao ar para o mesmo experimento.

Na avaliação dos tratamentos entre as épocas, apenas nos potenciais de -6 e -10 kPa a K_a foi maior em PDE e PD em 2010 comparado com 2009 na camada 0-5 cm (Tabela 11). Este resultado indica que houve uma melhoria do sistema poroso do solo de 2009 para 2010 em PDE e PD, mas não em PDNF. Isso possivelmente resultou em ausência de diferenças estatísticas entre tratamentos para o ano de 2010 no potencial de -6 kPa. Para os demais potenciais na camada 0-5 cm e para todos os potenciais na camada 5-10 cm não houve diferenças significativas entre 2009 e 2010 dentro de cada tratamento.

Houve ocorrência de K_a igual zero para os tratamentos PDE e PD no potencial -6 kPa na camada 0-5 cm e para todos os tratamentos na camada 5-10 cm nos potenciais: -6, -10 e -30 kPa. A K_a igual a $1 \mu\text{m}^2$ ($\log K_a=0$) indica ausência de fluxo devido aos poros estarem bloqueados e não fazendo parte do transporte convectivo do ar, o que acontece quando os poros estão preenchidos com água ou caso não estejam conectados (MCQUEEN; SHEPHERD, 2002). A ocorrência de poros muito pequenos em solos com alto teor de argila também propiciam valores de K_a próximos de zero, conforme relatado por Rodrigues et al. (2011). Porém, como era esperado, conforme o potencial de água no solo foi reduzido houve um aumento da K_a em todos os tratamentos e profundidades, uma vez que o espaço poroso anteriormente ocupado por água passou a ser preenchido com ar. A magnitude dos valores de K_a encontrados neste estudo se assemelham com os valores obtidos por Schjonning et al. (2007) para um solo arenoso compactado na Dinamarca, o qual teve K_a 6,5 vezes menor do que o solo não compactado no potencial -10 kPa.

Embora o PDNF tenha apresentado maior K_a somente no potencial -6 kPa para a camada 0-5 cm, esse fato é de extrema importância uma vez que a região apresenta um alto índice pluviométrico (acima 1400 mm). E a ausência de diferença significativa entre os anos para este tratamento nesta profundidade e potencial indica que mesmo 18 meses após o cultivo do nabo forrageiro houve uma manutenção da K_a no potencial -6 kPa. Isso torna o cultivo do nabo forrageiro uma possível opção para melhorar a K_a em sistema plantio direto em regiões de alta precipitação.

Tabela 11 – Valores médios de permeabilidade ao ar ($\log K_a$) para a cama de semeadura da cultura do milho (2009) e da cultura da soja (2010) para as profundidades de 0-5 e 5-10 cm de profundidade

Tratamento	0-5 cm		5-10 cm	
	2009	2010	2009	2010
-6 kPa				
PDE	-0,58bB	0,12aA	-0,89aA	-1,22aA
PD	-0,53bB	0,57aA	-1,19aA	-0,20aA
PDNF	0,09aA	0,47aA	-1,19aA	-0,98aA
-10 kPa				
PDE	-0,33aB	0,92aA	-0,49aA	-0,79aA
PD	0,28aB	0,68aA	-0,98aA	-0,04aA
PDNF	0,15aA	0,83aA	-0,69aA	-0,49aA
-30 kPa				
PDE	0,33aA	0,86aA	0,03aA	-0,37aA
PD	0,37aA	0,79bA	-0,44aA	-0,57aA
PDNF	0,42aA	1,05aA	-0,34aA	-0,19aA
-100 kPa				
PDE	1,22aA	1,12aA	1,28aA	0,12aA
PD	1,38aA	1,19aA	1,21aA	0,36aA
PDNF	1,23aA	1,23aA	1,28aA	0,08aA

PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas comparam médias entre tratamentos em cada época e profundidade, e letras maiúsculas comparam as médias entre os anos dentro de cada tratamento e profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

A permeabilidade ao ar foi maior na camada 0-5 cm comparado à camada 5-10 cm. Provavelmente os maiores valores de K_a na camada superficial podem ser atribuídos à operação de semeadura que promoveu um aumento na macroporosidade do solo em relação à camada 5-10 cm. Maiores valores de K_a na camada superficial em comparação à subsuperficial foram também encontrados por Cavalieri et al. (2009) e Rodrigues et al. (2011) em sistema plantio direto. Fish e Koppi (1994) relataram que a K_a é uma propriedade sensível para diferenciar os efeitos das práticas de manejo no solo. Devido à predominante ausência de diferenças significantes acredita-se que a alta variabilidade espacial da K_a associada ao fato de que os tratamentos propostos abrangem um único sistema de manejo (plantio direto) possa ter contribuído para isto.

2.3.1.7 Índices de continuidade de poros

2.3.1.7.1 Índice K_I

O índice K_I obtido pela relação entre K_a/ε_a é considerado por Groenevelt et al. (1984) um importante índice para determinar se as diferenças em K_a podem ser atribuídas à ε_a ou a

outros aspectos geométricos do espaço poroso, como a distribuição do tamanho de poros, tortuosidade, continuidade. Dessa forma quanto maior for o valor de K_I maior será a capacidade de transporte de ar devido ao alto grau de continuidade do sistema poroso do solo. O índice K_I também apresentou uma distribuição não normal, sendo assim seus valores foram transformados para a forma logarítmica com a finalidade de obter uma distribuição normal. Os valores médios de K_I para os potenciais estudados estão apresentados na Figura 12.

No potencial de -6 kPa na camada 0-5 cm o tratamento PDNF apresentou maior continuidade de poros ou menor tortuosidade que os tratamentos PDE e PD. Para os demais potenciais, no entanto, não houve diferenças significativas entre os tratamentos em ambas as épocas avaliadas. Na comparação entre anos, o K_I em PDE e PD nos potenciais -6 e -10 kPa foram significativamente maiores em 2010 que em 2009. Esses resultados são semelhantes aos resultados obtidos com os dados de K_a . Isso demonstra que o índice de continuidade de poros K_I na camada 0-5 cm foi coerente com os valores de K_a e corrobora o fato de que o cultivo da cultura do nabo forrageiro pode resultar em melhoria do sistema poroso do solo, principalmente em altos potenciais de água no solo.

A medida da K_a próximo à capacidade de campo é considerada a ideal por permitir uma estimativa adequada da condutividade da fração de poros grandes (IVERSEN et al., 2003). No entanto, os resultados obtidos para K_a e K_I no potencial -10 kPa não evidenciaram as possíveis diferenças existentes entre os tratamentos. Os resultados para K_a e K_I indicaram o potencial -6 kPa na camada 0-5 cm como mais adequado na diferenciação dos manejos aplicados ao solo.

Na camada 5-10 cm, o potencial -30 kPa foi o mais sensível para detectar diferenças entre os tratamentos. O tratamento PDE apresentou K_I significativamente maior que o PD e PDNF em 2009. Isso indica que a escarificação mecânica, aos seis meses após sua aplicação, propiciou uma maior continuidade de poros do que em PD e PDNF, sugerindo que a mobilização do solo sob PD não resultou em perda da continuidade dos poros deste solo. A ausência de diferença estatística entre épocas para o PDE no potencial -30 kPa indica que a continuidade de poros foi mantida até os 18 meses após escarificação, entretanto para a segunda época não houve diferenças entre os tratamentos (Figura 13). Os outros potenciais não apresentaram tratamentos com diferenças estatísticas entre si e nem entre épocas, com exceção do potencial -100 kPa onde todos os tratamentos foram estatisticamente maiores em 2009 comparado à 2010. Este resultado não era esperado, sendo atribuído a um possível erro envolvido nas medições que provavelmente subestimaram o K_I em 2010, uma vez que essa tendência não foi observada para os outros potenciais e nem para a camada 0-5 cm.

Figura 12 – Valores médios de $\log K_1$ para a camada 0-5 cm para a cama de semeadura de milho (2009) e soja (2010). PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas comparam médias entre tratamentos em cada época e profundidade, e letras maiúsculas comparam as médias entre os anos dentro de cada tratamento e profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

Figura 13 – Valores médios de $\log K_I$ para a camada 5-10 cm para a cama de semeadura de milho (2009) e soja (2010). PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro. Letras minúsculas comparam médias entre tratamentos em cada época e profundidade, e letras maiúsculas comparam as médias entre os anos dentro de cada tratamento e profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

2.3.1.7.2 Índice N

A permeabilidade ao ar foi relacionada com a porosidade de aeração pelo modelo linearizado da Eq. 12, obtendo os valores dos parâmetros M e N. A inclinação da reta entre $\log K_a$ e $\log \varepsilon_a$ que é o parâmetro N é um índice de continuidade de poros que representa a porcentagem de poros contínuos interligados disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da ε_a . Os valores médios de N não diferiram entre tratamentos e entre épocas para ambas as

profundidades avaliadas (Figura 14). Este resultado indica que pela avaliação do índice N todos os tratamentos em ambas as épocas e profundidades apresentaram uma continuidade de poros semelhantes. De maneira geral a camada 0-5 cm apresentou maiores valores de N, os quais variaram de 1,91 a 3,73, do que a camada 5-10 cm, que teve o N variando de 0,89 a 2,47. Isso indica que a camada 0-5 cm apresentou uma melhor continuidade de poros ou menor tortuosidade que a camada 5-10 cm. Valores semelhantes do índice N foram encontrados por Silveira Junior (2012) para o mesmo experimento, por Rodrigues et al. (2011) para um sistema plantio direto na mesma região do estudo e por Dorner e Horn (2009) em sistema de preparo reduzido na Alemanha. No entanto, Ball et al. (1988) encontraram valores superiores de N (3,87 a 8,64) para a camada superficial em sistema plantio direto. Para eles quanto maior o valor de N maior será a taxa de abertura de caminhos de poros contínuos com o aumento da porosidade de aeração.

Figura 14 – Valores médios do parâmetro N obtidos do modelo: $\log K_a = \log M + N \log \varepsilon_a$, para os tratamentos plantio direto escarificado (PDE), plantio direto (PD) e plantio direto cultivado com nabo forrageiro (PDNF) nas camadas 0-5 e 5-10 cm durante a cama de semeadura do milho (2009) e soja (2010). Letras minúsculas comparam médias entre tratamentos em cada época e profundidade, e letras maiúsculas comparam as médias entre os anos dentro de cada tratamento e profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

A tabela 12 mostra os parâmetros M e N obtidos da relação $\log K_a$ e $\log \varepsilon_a$ para cada tratamento, época e profundidade levando em conta os quatro potenciais mátricos utilizados na determinação da K_a . Os valores de N corroboram os resultados anteriores, os quais mostraram um ligeiro decréscimo de N da camada 0-5 para 5-10 cm. Os valores de N obtidos

pela regressão com os quatro potenciais (Tabela 12) foram semelhantes aos obtidos individualmente para cada potencial (Figura 14), com exceção dos tratamentos PDE e PD na camada 5-10 cm em 2010, os quais não apresentaram um ajuste significativo do modelo de regressão.

Tabela 12 – Parâmetros do modelo de regressão $\log K_a = \log M + N \log \varepsilon_a$ para os tratamentos plantio direto escarificado (PDE), plantio direto (PD) e plantio direto cultivado com nabo forrageiro (PDNF) nas camadas 0-5 e 5-10 cm durante a cama de semeadura do milho (2009) e soja (2010)

Tratamento	Profundidade (cm)	Log M	N	R ²
Cama de semeadura da cultura do milho (2009)				
PDE	0-5	2,72	3,45	0,53 ^{**}
PD	0-5	2,01	2,27	0,25 [*]
PDNF	0-5	3,62	4,88	0,73 ^{**}
PDE	5-10	2,12	2,32	0,40 ^{**}
PD	5-10	1,82	2,03	0,51 ^{**}
PDNF	5-10	1,87	2,02	0,49 ^{**}
Cama de semeadura da cultura da soja (2010)				
PDE	0-5	2,18	2,48	0,72 ^{**}
PD	0-5	2,14	2,51	0,69 ^{**}
PDNF	0-5	2,91	3,70	0,79 ^{**}
PDE	5-10	0,23	0,70	0,12 ^{NS}
PD	5-10	0,29	0,85	0,19 ^{NS}
PDNF	5-10	0,90	2,16	0,31 [*]

PDE- plantio direto escarificado; PD- plantio direto; PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; DP- desvio padrão; CV- coeficiente de variação.

*P<0,05; **P<0,01; ^{NS}Não significativo

A Figura 15 ilustra a relação log-log entre K_a e ε_a com os dados de todos os potenciais em cada tratamento e profundidade, obtendo-se o intercepto e o *slope* dessa relação. Observa-se que para a camada 0-5 cm nas duas épocas avaliadas o PDNF obteve numericamente maiores valores do *slope* N em relação ao PDE e PD. Na camada 5-10 cm em ambas as épocas os valores de N foram próximos entre si. Para a primeira época de avaliação os modelos de regressão explicaram de 40 a 73% da variabilidade em K_a . Já para a segunda época os modelos de regressão explicaram entre 31 a 79% da variabilidade em K_a .

Figura 15 – Relação logarítmica entre a permeabilidade ao ar (K_a) e a porosidade de aeração (ϵ_a), para os tratamentos plantio direto escarificado (PDE), plantio direto (PD) e plantio direto cultivado com nabo forrageiro (PDNF) nas camadas 0-5 e 5-10 cm durante a cama de semeadura do milho (2009) e soja (2010)

A porosidade bloqueada representa o valor de porosidade abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade do sistema poroso do mesmo (POULSEN et al., 2007). Os valores médios de porosidade bloqueada não diferiram significativamente entre tratamentos nem entre épocas para ambas as profundidades (Figura 16). Isso indica que a porosidade bloqueada seguiu tendência similar ao do índice N. Na primeira época o volume de poros bloqueados foi semelhante entre profundidades em cada tratamento. Já na segunda época houve um aumento no volume de poros bloqueados da camada 0-5 para 5-10 cm no PDE e PDNF. Todavia essas diferenças não foram significativas. Para a primeira época a porosidade bloqueada variou de 12,55 a 16,96%. Enquanto na segunda época essa variação

foi de 13,30 a 22,23%. Os valores de volume de poros bloqueados ao fluxo de ar foram maiores que os encontrados por Rodrigues et al. (2011) em sistema plantio direto na mesma região deste estudo (2 a 8%) e por Ball et al. (1988) também em plantio direto na Escócia (0 a 5,2%). Dorner e Horn (2009) por sua vez encontraram uma porcentagem de porosidade bloqueada muito baixa (<1%) para a camada superficial de um solo cultivado sob preparo reduzido.

Figura 16 – Valores médios da porosidade bloqueada ($10^{-\log(M)/N}$) para os tratamentos plantio direto escarificado (PDE), plantio direto (PD) e plantio direto cultivado com nabo forrageiro (PDNF) nas camadas 0-5 e 5-10 cm durante a cama de semeadura do milho (2009) e soja (2010). Letras minúsculas comparam médias entre tratamentos em cada época e profundidade, e letras maiúsculas comparam as medias entre os anos dentro de cada tratamento e profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

A porosidade de aeração não diferiu estatisticamente entre tratamentos, nem entre épocas em ambas as profundidades na capacidade de campo (-10 kPa) (Figura 17). Como era esperado, a porosidade de aeração foi maior na camada 0-5 que na 5-10 cm. Embora não significativo, houve um aumento da porosidade de aeração da primeira (2009) para a segunda época avaliada (2010). Essa melhoria do sistema poroso pode ser atribuída ao sistema de rotação de culturas, o qual teve a cultura do trigo e em seguida da soja (2010) cultivada após o cultivo do milho (2009), bem como à atividade biológica proporcionada pelo intenso sistema de rotação. A linha tracejada na Figura 17 representa o limite mínimo de 10% de porosidade de aeração para desenvolvimento das plantas (GRABLE; SIEMER, 1968). Dessa forma, somente o tratamento PD na camada 5-10 cm em 2009 apresentou porosidade de aeração

menor que o limite mínimo, com cerca de 7%. Valor semelhante de porosidade de aeração também para o sistema plantio direto nesta camada foi obtido por Lipiec et al. (2006). Mesmo com o limite mínimo de aeração de 10%, Schjonning et al. (1999) destacam que em porosidade de aeração menor que este valor pode ocorrer significativa difusividade de gás, especialmente em solos bem estruturados, que é o caso do plantio direto. No entanto, em 2010, o valor da porosidade de aeração no PD aumentou para 19%. Todavia observa-se que tanto PDE quanto PDNF também apresentaram porosidade de aeração próxima do limite de 10%, a qual foi de 11% para o PDE e 12% para o PDNF na camada 5-10 cm.

Figura 17 – Valores médios da porosidade de aeração (ϵ_a) na capacidade de campo (-10 kPa) para os tratamentos plantio direto escarificado (PDE), plantio direto (PD) e plantio direto cultivado com nabo forrageiro (PDNF) nas camadas 0-5 e 5-10 cm para a cama de semeadura do milho (2009) e soja (2010). Letras minúsculas comparam médias entre tratamentos em cada época e profundidade, e letras maiúsculas comparam as médias entre os anos dentro de cada tratamento e profundidade. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

2.3.1.8 Intervalo Hídrico Ótimo do Solo

A densidade do solo (D_s), dentre os atributos necessários ao cálculo do IHO, foi a propriedade que apresentou menores CV's em todos os tratamentos e profundidades em 2009 (Tabela 13). A baixa variabilidade desta propriedade foi também encontrada por diversos autores (FIDALSKI et al., 2010; BLAINSKI et al., 2012). A resistência do solo à penetração (RP) por sua vez apresentou elevados CV's, variando desde 43,85% para o PDNF na camada 5-10 cm até 76,24% para o PD em 0-5 cm. Essa alta variabilidade da RP é atribuída à ampla

faixa de tensões de água nas quais a RP é determinada (TORMENA et al., 1999; ARAÚJO et al., 2004). O conteúdo volumétrico de água apresentou uma variabilidade intermediária quando comparado à Ds e RP, com valores de CV entre 17,61 e 22,87%. De acordo com a classificação de CV proposta por Warrick e Nielsen (1980), a Ds, θ e RP apresentaram, respectivamente, baixa, média e muito alta variabilidade. Alguns autores determinando o IHO também encontraram a seguinte ordem crescente de CV: $Ds < \theta < RP$ (SILVA; KAY, 1997; TORMENA et al., 2007). Na segunda época avaliada (2010), estas propriedades apresentaram um comportamento semelhante ao da primeira época de avaliação em relação ao CV, destacando-se apenas um ligeiro aumento do CV do conteúdo de água que variou desde 22,21 até 25,35% (Tabela 13).

Os valores médios de Ds mostram que não houve diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos em ambas as épocas avaliadas para a camada 0-5 cm (Tabela 13). Este fato pode ser atribuído à homogeneização do solo pela operação de semeadura especialmente nesta camada de solo e também pela Ds ser uma medida que expressa a estrutura numa escala macroscópica. Na camada 5-10 cm em 2009 o PDE apresentou Ds significativamente menor que PD e PDNF, os quais apresentaram Ds estatisticamente iguais entre si. Na segunda época avaliada (2010), no entanto, o PDNF apresentou Ds significativamente maior que o PD e PDE. Esses resultados refletem o efeito da escarificação mecânica em reduzir a Ds somente até os seis meses após aplicação da mesma. Os menores valores de RP no PDE comparado aos do PD e PDNF em 2009 corroboram este fato (Tabela 13).

Na comparação da Ds entre épocas somente o PDE não apresentou diferenças de 2009 para 2010 na camada de 0-5 cm (Tabela 13). Para a camada 5-10 cm todos os tratamentos mostraram uma significativa redução da Ds de 2009 para 2010. Esses resultados mostram que, com exceção do PDE em 0-5 cm, não houve uma estabilidade temporal da Ds ao longo dos tratamentos. A redução da Ds encontrada pode estar relacionada com o regime de chuvas da área, pois em 2009 foi observada uma maior precipitação durante a cama de semeadura do milho comparado à cama de semeadura da soja. Essa maior precipitação em 2009 pode ter favorecido a reconsolidação do solo em resposta à operação de semeadura, resultando em maior Ds do que em 2010. Busscher et al. (2002) encontraram altos valores de RP na camada superficial e atribuíram isso ao efeito do regime de chuvas que promoveu a reconsolidação desta camada.

Tabela 13 – Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), conteúdo de água (θ , $m^3\ m^{-3}$) e resistência à penetração (RP, MPa) da cama de semeadura da cultura do milho em 2009 e da soja em 2010

Variável	Média	DP	CV	Mínimo	Máximo
0-5 cm					
PDE/2009					
Ds	1,04 aA	0,10	9,49	0,82	1,19
θ	0,38	0,09	22,87	0,19	0,54
RP	0,74	0,53	71,63	0,12	2,45
PDE/2010					
Ds	1,04aA	0,07	6,72	0,91	1,25
θ	0,32	0,17	25,35	0,17	0,47
RP	0,79	0,20	73,87	0,20	2,39
PD/2009					
Ds	1,09 aA	0,10	9,21	0,88	1,32
θ	0,38	0,08	20,00	0,22	0,54
RP	1,01	0,77	76,24	0,15	3,20
PD/2010					
Ds	1,03aB	0,07	7,11	0,89	1,23
θ	0,32	0,08	25,12	0,18	0,46
RP	0,76	0,53	69,40	0,16	2,35
PDNF/2009					
Ds	1,07 aA	0,08	7,58	0,84	1,25
θ	0,37	0,07	18,74	0,20	0,50
RP	0,85	0,52	61,35	0,12	2,06
PDNF/2010					
Ds	1,02aB	0,05	4,50	0,91	1,12
θ	0,32	0,08	24,54	0,18	0,48
RP	0,76	0,57	75,57	0,16	2,52
5-10 cm					
PDE/2009					
Ds	1,22 bA	0,06	4,58	1,08	1,36
θ	0,39	0,08	20,26	0,22	0,54
RP	1,73	0,82	47,13	0,35	3,73
PDE/2010					
Ds	1,17aB	0,06	5,21	1,05	1,31
θ	0,35	0,08	23,19	0,19	0,51
RP	1,71	0,99	57,83	0,29	4,11
PD/2009					
Ds	1,27 aA	0,07	5,82	0,99	1,43
θ	0,40	0,08	19,78	0,22	0,53
RP	2,36	1,09	45,17	0,78	5,51
PD/2010					
Ds	1,16bB	0,08	7,28	0,99	1,31
θ	0,34	0,08	22,21	0,19	0,48
RP	1,63	1,05	64,68	0,24	3,69
PDNF/2009					
Ds	1,27 aA	0,07	5,25	1,10	1,38
θ	0,39	0,07	17,61	0,26	0,52
RP	2,11	0,92	43,85	0,25	4,90
PDNF/2010					
Ds	1,20aB	0,07	6,05	1,02	1,34
θ	0,34	0,08	22,70	0,19	0,48
RP	1,98	1,03	52,13	0,69	4,80

PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro, DP - desvio padrão; CV – coeficiente de variação. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo ano e letras maiúsculas comparam os anos dentro do mesmo tratamento. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Os modelos ajustados à curva de resistência do solo à penetração mostraram, como esperado, que a RP foi positivamente correlacionada com a Ds e negativamente com θ em todos os tratamentos, épocas e profundidades avaliadas (Tabela 14). Semelhantes resultados foram encontrados por Silva et al. (1994) e Imhoff et al. (2001). As equações ajustadas mostram que Ds e conteúdo de água explicaram de 55 a 77% da variabilidade da RP na primeira época e de 46 a 85% na segunda avaliação. Os modelos ajustados à curva de retenção de água mostraram que o conteúdo de água foi positivamente correlacionado com a Ds e negativamente com o potencial de água no solo. É comum observar um aumento na retenção de água associado ao aumento na densidade do solo, provavelmente devido à redução da macroporosidade do solo (TORMENA et al., 1999; CALONEGO; ROSOLEM, 2011). As equações ajustadas explicaram de 83 a 93% da variabilidade no conteúdo de água na primeira época avaliada e de 92 a 95% na segunda época (Tabela 14).

O intervalo hídrico ótimo para a cama de semeadura de milho nos tratamentos estudados está apresentado na Figura 18. Nesta primeira época avaliada, na camada 0-5 cm, a capacidade de campo foi o limite superior para quase toda a extensão do IHO em todos os tratamentos. A PA substituiu a capacidade de campo como limite superior em valores de Ds de 1,17; 1,19 e 1,20 Mg m^{-3} , respectivamente, para PDE, PD e PDNF, já na extremidade final do IHO. Esses maiores valores de Ds em PD e PDNF nos quais a PA assumiu o limite superior comparado ao menor valor em PDE indicam, mesmo com os índices de continuidade de poros não apresentando diferenças significativas, que os tratamentos sem intervenção mecânica propiciaram um melhor sistema poroso do solo. O maior valor em PDNF sugere que a escarificação biológica dentre os tratamentos garantiu uma melhor aeração em maiores valores de Ds. Isso pode estar ligado à presença de poros maiores advindos do sistema PD bem como da utilização do nabo forrageiro como descompactador biológico do solo. Alguns autores também observaram efeitos benéficos da bioporosidade do solo em sistema plantio direto (SHIPITALO; PROTZ, 1987; LIEPIC; HATANO, 2003).

A resistência do solo à penetração, por sua vez, substituiu o PM tornando-se o limite inferior somente na extensão final do IHO em valores de Ds de 1,17 Mg m^{-3} para o PDE e PD, e 1,11 Mg m^{-3} para o PDNF (Figura 18). Já este menor valor de Ds no qual a resistência à penetração assume o limite inferior em PDNF pode ser atribuído ao fato de que a maior bioporosidade ocasionada neste tratamento possivelmente provoca também o maior secamento do solo, o que consequentemente faz a RP se tornar limitante em menor valor de Ds. Para o PDE na camada 0-5 cm, 8% das amostras tiveram PA e RP como os limites do IHO. Para o PD, 25% das amostras tiveram PA como limite superior e 28% tiveram a RP

como limite inferior. Já o PDNF teve PA como limite superior e RP como limite inferior em, respectivamente, 3 e 40% das amostras.

Tabela 14 – Ajuste das equações da curva de resistência do solo à penetração (CRS) e da curva de retenção de água (CRA) para a cama de semeadura da cultura do milho em 2009 e soja em 2010

Tratamento	Equação da CRS	R ²	Equação da CRA	R ²
Primeira avaliação/2009				
0-5 cm				
PDE	$RP = 0,1250\theta^{-1,4022}Ds^{5,9737}$	0,77	$\theta = e^{(-1,8763+0,4574Ds)}\Psi^{-0,1124}$	0,90
PD	$RP = 0,1307\theta^{-1,3260}Ds^{6,8024}$	0,74	$\theta = e^{(-1,8965+0,5172Ds)}\Psi^{-0,0995}$	0,83
PDNF	$RP = 0,0475\theta^{-2,3222}Ds^{6,8559}$	0,55	$\theta = e^{(-2,0315+0,6877Ds)}\Psi^{-0,0808}$	0,87
5-10 cm				
PDE	$RP = 0,1353\theta^{-1,6069}Ds^{4,7757}$	0,69	$\theta = e^{(-1,8659+0,4448Ds)}\Psi^{-0,1035}$	0,89
PD	$RP = 0,1638\theta^{-1,6079}Ds^{4,5369}$	0,71	$\theta = e^{(-1,2977+0,0116Ds)}\Psi^{-0,1029}$	0,93
PDNF	$RP = 0,1135\theta^{-1,7235}Ds^{5,2176}$	0,69	$\theta = e^{(-1,5575+0,2321Ds)}\Psi^{-0,0869}$	0,88
Segunda avaliação/ 2010				
0-5 cm				
PDE	$RP = 0,0362\theta^{-2,1123}Ds^{10,018}$	0,63	$\theta = e^{(-2,5644+0,9056Ds)}\Psi^{-0,1235}$	0,95
PD	$RP = 0,0998\theta^{-1,5779}Ds^{4,1699}$	0,48	$\theta = e^{(-2,3442+0,6959Ds)}\Psi^{-0,1252}$	0,94
PDNF	$RP = 0,0316\theta^{-2,2644}Ds^{11,970}$	0,85	$\theta = e^{(-2,3860+0,7299Ds)}\Psi^{-0,1258}$	0,94
5-10 cm				
PDE	$RP = 0,1253\theta^{-1,4305}Ds^{6,0190}$	0,72	$\theta = e^{(-1,8817+0,3009Ds)}\Psi^{-0,1217}$	0,93
PD	$RP = 0,1410\theta^{-1,4472}Ds^{5,4675}$	0,70	$\theta = e^{(-2,0246+0,4521Ds)}\Psi^{-0,1113}$	0,92
PDNF	$RP = 0,1796\theta^{-1,3571}Ds^{4,7754}$	0,46	$\theta = e^{(-1,9489+0,3694Ds)}\Psi^{-0,1149}$	0,95

PDE - plantio direto escarificado, PD - plantio direto, PDNF - plantio direto cultivado com nabo forrageiro, RP (resistência do solo à penetração, MPa); θ (conteúdo de água, m³ m⁻³); Ds (densidade do solo, Mg m⁻³); Ψ (potencial de água no solo, MPa). p < 0,0001.

Para a camada 5-10 cm de profundidade, no entanto, RP foi o limite inferior para toda a extensão do IHO nos tratamentos PDE e PDNF, enquanto no PD a RP assumiu o limite inferior em Ds igual a 1,18 Mg m⁻³, representando 95% das amostras (Figura 14). Resultados semelhantes foram encontrados por Olibone et al. (2010) quando avaliaram o sistema PD com e sem escarificação mecânica. A PA foi o limite superior em 35% das amostras em PDE, 85% em PD e 38% em PDNF para a camada 5-10 cm. Os resultados indicam que na camada 0-5 cm a PA foi mais limitante em PD, enquanto a RP foi mais limitante em PDNF. Isso mostra o tratamento PDE como o menos afetado por limitações relacionadas à aeração e RP. Provavelmente este fato esteja relacionado ao efeito residual da escarificação mecânica do solo que promoveu uma melhoria da condição física do solo avaliada aos seis meses após sua aplicação.

Figura 18 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo para a cama de semeadura de milho em 2009. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo do solo (IHO). PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; PD- plantio direto; PDE- plantio direto escarificado

Na camada 5-10 cm a PA foi novamente mais limitante em PD seguido do PDNF e PDE. Isso indica que a escarificação mecânica e biológica foram eficientes em melhorar a aeração do solo. A resistência a penetração apresentou a seguinte sequência de limitação: $PDE = PDNF > PD$. Dos fatores que compõem o IHO a RP foi o mais limitante em ambas as profundidades. Muitos trabalhos avaliando o IHO também mostraram a RP como o mais limitante fator do solo (BENJAMIN et al., 2003; OLIBONE et al., 2010). Isso mostra que o IHO foi um parâmetro mais sensível em detectar mudanças na estrutura do solo que a curva de retenção de água (SILVA et al., 2011; SILVA et al., 1994).

Na segunda época avaliada (2010) houve uma melhoria dos limites de disponibilidade de água que compõem o IHO (Figura 19). Na camada 0-5 cm, o teor de água na capacidade de campo foi o limite superior do IHO para o PD e PDNF e em quase toda a extensão do IHO do PDE, exceto em valores de $D_s > 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ onde a porosidade de aeração assumiu o limite superior em 3% das amostras (Figura 19). A RP foi o limite inferior em aproximadamente metade da extensão do IHO para todos os tratamentos. Os valores de D_s nos quais a RP assumiu o limite inferior foram $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PDE, $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PD e $1,04 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PDNF. A quantidade de amostras que teve a RP como limite inferior do IHO foi 40%, 13% e 43%, respectivamente, para PDE, PD e PDNF.

Para a camada 5-10 cm a capacidade de campo foi novamente o limite superior em toda a extensão do IHO em PD e PDNF, e em 92% das amostras em PDE (Figura 19). A resistência a penetração foi o limite inferior em praticamente toda a extensão do IHO. A RP se tornou o limite inferior a partir de valores de D_s de $1,10 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PDE, $1,09 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PD e $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PDNF. O PDE teve cerca de 93% das amostras com RP como limite inferior, enquanto o PD teve 75% e o PDNF teve 98%. Esses resultados mostram que de forma semelhante à primeira época, a RP foi mais limitante que a porosidade de aeração. Todavia, de forma diferente à primeira época, PDE e PDNF foram os tratamentos que apresentaram maiores limitações em relação ao IHO. Isso mostra que os efeitos da escarificação mecânica não perduraram até os 18 meses após sua aplicação e que a escarificação biológica não mostrou influência positiva sobre o IHO em ambas as épocas amostradas. Diferentes resultados foram encontrados por Olibone et al. (2010) que mostraram efeitos benéficos da escarificação mecânica no IHO até os dois anos após sua aplicação.

Figura 19 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo para a cama de semeadura de soja 2009. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo do solo (IHO). PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; PD- plantio direto; PDE- plantio direto escarificado

A densidade do solo na qual o IHO é igual a zero é conhecida como densidade do solo crítica (Dsc) e, sua ocorrência pode ser entendida como um sinal de degradação do solo (SILVA et al., 1994). Na primeira época avaliada não foi detectada Dsc para o PD e PDNF na camada 0-5 cm (Figura 18); já para o PD, a densidade do solo crítica foi de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$, o qual teve 8% das amostras com $D_s > D_{sc}$. Na camada 5-10 cm, o PDE, PD e PDNF tiveram, respectivamente, densidade do solo crítica de 1,30; 1,26 e $1,28 \text{ Mg m}^{-3}$. O PDE teve 3% das amostras com valor igual ou superior ao da densidade do solo crítica, enquanto PD teve 60% e PDNF teve 50%. Estes resultados indicam que comparado ao PD e PDNF, a escarificação mecânica foi eficiente em melhorar a qualidade física do solo no curto prazo (seis meses), uma vez que o PDE apresentou o maior valor de D_s em que o IHO é igual a zero. Isso significa que com o aumento da D_s ocorreria IHO igual zero primeiro em PD, seguido pelo PDNF e por último em PDE, ou seja, quanto maior for a D_s na qual o IHO é igual a zero, menor será a probabilidade de limitação hídrica no solo.

Na segunda época avaliada o tratamento PDE apresentou ocorrência de densidade do solo crítica para as duas profundidades, sendo $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ para 0-5 cm e $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$ para 5-10 cm (Figura 19). Todavia, a porcentagem de amostras com D_s maior que a D_{sc} foi baixa nas duas profundidades: 3% para 0-5 cm e 8% para 5-10 cm. Os tratamentos PD e PDNF não apresentaram densidade do solo crítica para a camada 0-5 cm, enquanto a camada 5-10 cm de ambos os tratamentos apresentaram densidade do solo crítica de $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$. O tratamento PD teve apenas 8% das amostras com D_s crítica, já para o PDNF esse valor subiu para 23%. Em relação à densidade do solo crítica o PDE foi o tratamento mais limitante, seguido pelo PDNF e por último o PD. Semelhantes resultados, no entanto foram encontrados por Olibone et al. (2010) que observaram maiores valores de D_{sc} em plantio direto sem escarificação. Os resultados apontam para o fato de que não houve efeitos benéficos da escarificação mecânica e biológica do solo no IHO aos 18 meses após sua aplicação. Os resultados indicam que o solo após sofrer uma intervenção pela escarificação mecânica apresentou uma reconsolidação da sua estrutura verificada aos 18 meses após a intervenção sofrida. Alguns autores têm demonstrado por meio de outras propriedades do solo sua capacidade de se reconsolidar após sofrer revolvimento (UTOMO; DEXTER, 1981; DEXTER, 1991).

O IHO foi positivamente correlacionado com a D_s até $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PDE, $1,12 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PD e $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PDNF na camada 0-5 cm (Figura 20). Os maiores valores de IHO foram observados para o tratamento PDE, seguido do PD e PDNF. A relação entre IHO e D_s indica que o tratamento PDE teve, para os mesmos valores de D_s , maiores conteúdo de água que os tratamentos PD e PDNF. Para a camada 5-10 cm o IHO foi

negativamente correlacionado com a Ds em todos os tratamentos (Figura 20). As curvas da relação entre IHO e Ds dos tratamentos apresentaram um similar padrão de decréscimo com o aumento da Ds; todavia o tratamento PDE manteve os maiores valores de IHO comparado aos demais tratamentos. Esse resultado corrobora com os resultados anteriormente discutidos de que a escarificação mecânica trouxe melhorias físicas para a cama de semeadura do solo no curto prazo. Contrariamente, os resultados do tratamento PDNF não evidenciam melhoria da condição física do solo pela escarificação biológica aos seis meses após aplicação do tratamento.

A relação entre IHO e densidade do solo relativa (Ds relativa) apresentou um padrão de distribuição das curvas semelhante ao da relação entre IHO e densidade do solo (Figura 20). Na camada 0-5 cm o IHO aumentou até valores de Ds relativa de 0,86 para o PDE e 0,85 para PD e PDNF. O valor de Ds relativa em que IHO é igual a zero correspondeu a um valor de 0,96 para o PD, o qual é superior ao valor médio de Ds relativa para este tratamento (0,83). Isto indica que para 0-5 cm, o PD foi o tratamento mais limitante com relação à compactação do solo. Na camada 5-10 cm houve um decréscimo do IHO com o aumento da Ds relativa. Os valores de IHO igual a zero corresponderam a Ds relativa de 1,00; 0,94 e 0,95, respectivamente, para PDE, PD e PDNF. Os valores médios de Ds relativa para PD (0,95) e PDNF (0,94) indicam que esses tratamentos apresentaram uma condição física mais restritiva que o tratamento PDE (0,90), o qual apresentou IHO igual a zero somente quando o solo alcançou seu máximo valor de densidade.

Valores de densidade do solo relativa entre 0,77 a 0,90 têm sido associados como a faixa de ótimos valores desta propriedade (CARTER, 1990; HAKANSSON, 1990; REICHERT et al., 2009). Dessa forma, observa-se que todos os tratamentos apresentaram adequados valores de Ds relativa, exceto o PD e PDNF na camada 5-10 cm, indicando que estes tratamentos apresentaram excessivos valores de Ds na cama de semeadura do milho. Todavia os altos valores de Ds relativa nos quais o IHO é igual a zero indicam que houve disponibilidade de água no solo nesses tratamentos mesmo sob altas densidades do solo. Estes resultados sugerem que o manejo de longa duração com plantio direto melhora a estrutura do solo e sua rede de macroporos (BLANCO-CANQUI et al., 2009).

Figura 20 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo (D_s) e da densidade do solo relativa para a cama de semeadura de milho em 2009. PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; PD- plantio direto; PDE- plantio direto escarificado

A relação entre IHO e D_s para a segunda época avaliada foi positiva até valores de $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ no PDE, $1,13 \text{ Mg m}^{-3}$ no PD e $1,03 \text{ Mg m}^{-3}$ no PDNF para a camada 0-5 cm (Figura 21). A partir desses valores houve decréscimo do IHO com o aumento da D_s em todos os tratamentos, todavia, de forma mais abrupta para os tratamentos PDE e PDNF. O tratamento PD apresentou maiores valores de IHO, mostrando que o PD teve maior disponibilidade de água que o PDE e PDNF principalmente em altos valores de D_s . Para a camada 5-10 cm a relação entre IHO e D_s foi inversamente proporcional (Figura 21). O tratamento PDE apresentou valores de IHO ligeiramente maiores que PD e PDNF, apesar disso as curvas tiveram semelhante formato e sobreposição, especialmente, para os maiores

valores de densidade do solo. Esses resultados mostram que de forma contrária à primeira época de avaliação (6 meses), não foi possível observar efeito residual da escarificação mecânica aos 18 meses após sua aplicação. A relação entre IHO e Ds mostra ainda que de forma semelhante à primeira época, não houve evidências dos efeitos da escarificação biológica sobre o IHO do solo também aos 18 meses após sua aplicação.

Figura 21 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo (Ds) e densidade do solo relativa para a cama de semeadura de soja em 2010. PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; PD- plantio direto; PDE- plantio direto escarificado

O IHO aumentou com o aumento da densidade do solo relativa até valores de 0,80 para o PDE, 0,86 para o PD e 0,79 para o PDNF para a camada 0-5 cm (Figura 21). Esses resultados corroboram os anteriores, pois também mostram que o PD propiciou maior

disponibilidade de água que os outros tratamentos mesmo em altos valores de Ds. Para a camada 5-10 cm os valores de densidade do solo relativa nos quais o IHO foi igual a zero foram 0,97; 0,95 e 0,94, respectivamente, para PDE, PD e PDNF. Todavia, os valores médios de densidade relativa para PDE (0,88), PD (0,86) e PDNF (0,89) estiveram bem abaixo dos valores nos quais o IHO foi igual a zero. De forma semelhante à primeira época, todos os tratamentos apresentaram adequados valores médios de Ds relativa. Contudo a melhor relação entre IHO e Ds relativa foi encontrada para o tratamento PD.

Na primeira época avaliada o IHO apresentou valores médios significativamente ($p < 0,05$) maiores em PDE que em PD e PDNF nas duas profundidades (Figura 22). Esse resultado mostra que o IHO foi um parâmetro sensível em detectar o efeito da escarificação e que esta prática foi eficiente em promover a melhoria da condição física do solo avaliada aos seis meses após sua aplicação. Resultado semelhante foi encontrado por Araujo et al. (2004) que avaliaram o IHO em um solo sob plantio direto aos seis meses após escarificação mecânica e observaram um efeito benéfico desta prática na condição estrutural do solo para a camada 0-15 cm.

Na segunda época avaliada o PD apresentou maior IHO do que o PDE e PDNF na camada 0-5 cm. Na camada 5-10 cm PD e PDE foram significativamente maiores que PDNF (Figura 22). Isso mostra que de forma contrária à primeira avaliação, na comparação entre tratamentos não houve efeito da escarificação mecânica aos 18 meses após sua aplicação. Enquanto os efeitos da escarificação biológica não foram notados nem a curto e nem a médio prazo dentre os tratamentos. Nicoloso et al. (2008) avaliando propriedades físico-hídricas do solo observaram que a escarificação mecânica apresentou um efeito temporário de apenas nove meses. Porém de forma contrária aos nossos resultados, estes autores também observaram que a utilização do nabo forrageiro como um descompactador biológico melhorou a condição física do solo. Para Abreu et al. (2004), entretanto, o efeito da escarificação dependeu da propriedade física do solo avaliada. Para eles quando o indicador condutividade hidráulica do solo saturado foi utilizado a escarificação biológica foi mais eficaz, todavia quando a resistência à penetração foi avaliada foi a escarificação mecânica que apresentou melhores resultados. Na avaliação entre épocas o IHO em PDE foi maior em 2009 que em 2010 na camada 0-5 cm. Já em 5-10 cm o IHO em PDE foi igual entre as épocas. Isso mostra um possível efeito negativo da escarificação mecânica do solo para a camada 0-5 cm, mas não para 5-10 cm. Os tratamentos PD e PDNF tiveram IHO significativamente maiores em 2010 que em 2009 para as duas profundidades avaliadas, indicando uma melhoria da condição

física do solo de um ano para o outro. Isto sugere que a redução da Ds de 2009 para 2010 pode ter influenciado positivamente no IHO destes tratamentos.

Os resultados mostraram que a escarificação mecânica melhorou a condição física do solo no curto prazo (seis meses), entretanto, na avaliação feita no médio prazo (18 meses) seus efeitos não foram mais persistentes. Diversos trabalhos avaliando outras propriedades físicas do solo tem também encontrado resultados semelhantes (EVANS et al., 1996; BUSSCHER et al., 2002; ARAÚJO et al., 2004; MAHL et al., 2008; CALONEGO; ROSOLEM, 2010). Os resultados com IHO corroboram, portanto, com os da literatura de que realmente a escarificação mecânica tem efeito efêmero, não sendo uma prática recomendada para o sistema plantio direto com vistas a melhorar a qualidade física do solo. Com relação à escarificação biológica pelo uso de plantas com sistema radicular agressivo as informações na literatura são mais escassas e controversas. Enquanto alguns autores encontraram efeitos benéficos e persistentes da escarificação biológica (WILLIAMS; WEIL, 2004; NICOLOSO et al., 2008; CHEN; WEIL, 2010), os resultados deste estudo corroboram com os de Cresswell e Kirkegaard (1995) e Kubota et al. (2005) que não observaram melhoria da condição física do solo pelo cultivo de plantas com sistema radicular agressivo. Portanto, são necessários mais estudos sobre o funcionamento de plantas com sistema radicular agressivo como descompactadores biológicos do solo em sistema plantio direto.

Figura 22 – Valores médios do intervalo hídrico ótimo (IHO) para as duas épocas avaliadas. PDNF- plantio direto cultivado com nabo forrageiro; PD- plantio direto; PDE- plantio direto escarificado. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo ano e letras maiúsculas comparam os anos dentro do mesmo tratamento. Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%

2.3.2 Experimento Sistemas de preparo do solo – EUA

2.3.2.1 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do trigo – 2011

A emergência do trigo foi maior para o PD comparado ao PC e PR para todos os dias avaliados (Tabela 15). A taxa de emergência e o IVE seguiram a mesma tendência, sendo também significativamente maiores em PD do que em PR e PC (Figura 23). O número final de plantas de trigo por metro foi 39 para o PD, 35 para o PR e 34 para o PC. Isso resultou em uma taxa de emergência de 78, 69 e 68% para, respectivamente, PD, PR e PC. Isto mostra que a emergência em PD foi cerca de 10 % maior que em PR e PC. O IVE por sua vez foi de 12,08 para PD, 8,68 para PR e 7,57 para o PC. Resultados semelhantes foram obtidos por Lima et al. (2010) que encontraram um maior índice de velocidade de emergência para a cultura da soja em PD do que em PC. Dam et al. (2005) avaliando a emergência de milho também observaram que esta foi melhor em PD do que em PC.

Os melhores resultados dos parâmetros de emergência em PD podem ser atribuídos à melhor estrutura e cobertura do solo sob este sistema o que resultou em uma melhor condição física do solo para a cama de semeadura do trigo. Provavelmente, em sistema plantio direto esta melhor estrutura do solo favoreceu maior contato solo-semente comparado aos sistemas de preparo reduzido e convencional. Um adequado contato solo-semente é considerado primordial para o sucesso da emergência e estabelecimento das culturas (PERDOK; KOWENHOVEN, 1994; BROWN et al., 1996).

Tabela 15 – Valores médios de emergência de trigo (plantas m⁻¹) do oitavo ao décimo terceiro dia após semeadura

DAS	Tratamentos		
	PC	PR	PD
8°	0 b	1 b	3 a
9°	1 b	4 b	12 a
10°	10 c	14 b	24 a
11°	21 b	24 b	33 a
12°	31 b	32 b	38 a
13°	34 b	35 b	39 a

DAS – dias após semeadura, PC – preparo convencional, PR – preparo reduzido, PD - plantio direto. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Figura 23 – Valores médios da taxa de emergência (%) e índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura do trigo 2011. PC – preparo convencional, PR – preparo reduzido, PD - plantio direto. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

O conteúdo de água foi maior em PD para todos os dias avaliados e teve uma menor variação comparada aos outros tratamentos, começando com $0,34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e finalizando com $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto para PR e PC a variação entre a primeira e última leitura foi maior (Tabela 16). Esta variação representou uma perda de água de 15% em PD, 24% em PC e 30% em PR do primeiro para o último dia avaliado. Esses resultados indicam que o PD foi mais eficiente em armazenar água no solo no período de cama de semeadura do trigo que o PR e PC. Peterson e Westfall (2004) relatam que o PD melhora a captura da precipitação pelo solo resultando em uma maior retenção de água. As diferenças de conteúdo de água entre PR e PC foram pequenas, com o PR apresentando maior conteúdo de água somente do primeiro ao quinto DAS.

A resistência do solo à penetração, a qual foi ajustada pelos valores de conteúdo de água no solo, foi significativamente maior em PC do que em PR e PD até o quinto dia avaliado. Do sexto ao décimo terceiro dia, tanto PC quanto PR foram significativamente maiores que o PD. A redução no conteúdo de água do primeiro para o último dia de avaliação implicou em um aumento na resistência à penetração da ordem de 35% no PD, 37% no PR e 42% no PC. A maior resistência à penetração encontrada para o PD está de acordo com os resultados de alguns estudos (STONE; SILVEIRA, 1999; FABRIZZI et al., 2005).

Tabela 16 - Valores médios diários de conteúdo de água e resistência do solo à penetração da cama de semeadura da cultura do trigo 2011 sob sistemas de manejo do solo

DAS	Conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			Resistência à penetração (MPa)		
	PC	PR	PD	PC	PR	PD
1º	0,28 c	0,32 b	0,34 a	1,98 a	1,79 b	1,64 c
2º	0,29 c	0,30 b	0,32 a	1,87 a	1,78 b	1,67 c
3º	0,28 c	0,30 b	0,32 a	2,00 a	1,92 b	1,81 c
4º	0,26 c	0,27 b	0,30 a	1,98 a	1,92 b	1,83 c
5º	0,24 c	0,26 b	0,29 a	2,14 a	2,10 b	2,00 c
6º	0,24 b	0,25 b	0,29 a	2,21 a	2,18 a	2,04 b
7º	0,25 b	0,25 b	0,29 a	2,26 a	2,27 a	2,13 b
8º	0,24 b	0,25 b	0,28 a	2,38 a	2,41 a	2,25 b
9º	0,22 b	0,23 b	0,26 a	2,59 a	2,58 a	2,40 b
10º	0,22 b	0,23 b	0,26 a	2,70 a	2,67 a	2,49 b
11º	0,22 b	0,23 b	0,27 a	2,71 a	2,69 a	2,57 b
12º	0,22 b	0,22 b	0,27 a	2,85 a	2,85 a	2,61 b
13º	0,22 b	0,22 b	0,29 a	2,83 a	2,82 a	2,51 b
Média geral	0,25 b	0,26 b	0,29 a	2,35 a	2,30 a	2,15 b

DAS – dias após semeadura, PC – preparo convencional, PR – preparo reduzido, PD - plantio direto. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

2.3.2.2 Intervalo Hídrico Ótimo do Solo

Os efeitos do preparo do solo no IHO foram considerados em conjunto com as duas doses de N, uma vez que não houve efeitos da aplicação de N. Dentre as propriedades que compõem o IHO, a densidade do solo foi a que apresentou menor variabilidade (Tabela 17). O menor coeficiente de variação da densidade do solo foi obtido no PD na camada 5-10 cm (2,76%) e o maior no PR na camada 0-5 cm (8,34%). A RP apresentou os maiores valores de CV, indicando que a pontualidade de medição desta propriedade pode ser responsável pela alta variabilidade apresentada. O conteúdo volumétrico de água no solo apresentou valores intermediários de CV em comparação à Ds e RP. Todavia apresentou altos CV, que variaram desde 14,97 até 39,87%, especialmente para a camada 0-5 cm. De forma geral, a camada 0-5 cm apresentou maiores CV's que a camada 5-10 cm, o que pode estar associado com a menor interferência de semeadura e a menor variação da matéria orgânica nesta última camada em comparação à primeira. Diversos estudos também observaram menores CV's para Ds e maiores para o conteúdo de água e PR (TORMENA et al., 1999; BLAINSKI et al., 2009). Isso pode ser atribuído ao fato que conteúdo de água e RP foram determinados em ampla faixa de potencial de água no solo (TORMENA et al., 2007).

Os sistemas de preparo afetaram a Ds (Tabela 17). O tratamento PD resultou em Ds 6% maior que no tratamento PC na camada 0-5 cm e 4% maior na camada 5-10 cm. A maior

Ds encontrada sob PD que em PC pode ser atribuída à ausência de mobilização do solo em sistema plantio direto. Outros estudos também encontraram maiores valores de Ds em sistema plantio direto (SINGH; MALHI, 2006; ALVARO-FUENTES et al., 2008; PIKUL et al., 2009). Contudo, este efeito não influenciou no valor médio de RP, o qual não variou significativamente entre os sistemas de preparo e profundidades (Tabela 17). Resultado diferente foi obtido por Tormena et al. (2007), quem observou que um aumento na Ds aumentou os valores de RP em um Latossolo sob sistema plantio direto. Os sistemas de preparo também não afetaram a retenção de água de no solo (Tabela 17) o que está de acordo com os resultados relatados por McVay et al. (2006) para o mesmo experimento.

Tabela 17 - Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (D_s , $Mg\ m^{-3}$), conteúdo de água (θ , $m^3\ m^{-3}$) e resistência à penetração (RP, MPa) da cama de semeadura da cultura do trigo em 2011

Variável	Média	DP	CV	Mínimo	Máximo
PC 0-5 cm					
Ds	1,19 b	0,07	5,73	1,09	1,35
θ	0,30	0,12	39,87	0,18	0,55
RP	0,89	0,58	65,10	0,06	2,56
PC 5-10 cm					
Ds	1,43 b	0,04	2,78	1,35	1,51
θ	0,35	0,06	17,08	0,26	0,48
RP	1,41	0,72	50,59	0,41	3,07
PR 0-5 cm					
Ds	1,22 ab	0,10	8,34	1,01	1,39
θ	0,32	0,11	34,52	0,18	0,56
RP	0,92	0,50	54,32	0,06	2,08
PR 5-10 cm					
Ds	1,44 b	0,05	3,48	1,33	1,55
θ	0,37	0,05	14,97	0,27	0,47
RP	1,27	0,56	43,92	0,50	3,05
PD 0-5 cm					
Ds	1,26 a	0,08	6,56	1,10	1,47
θ	0,33	0,10	30,76	0,21	0,54
RP	0,93	0,57	60,51	0,15	2,54
PD 5-10 cm					
Ds	1,49 a	0,04	2,76	1,40	1,58
θ	0,37	0,06	15,23	0,27	0,48
RP	1,46	0,82	55,77	0,55	3,24

PC – preparo convencional, PR – preparo reduzido, PD - plantio direto, DP - desvio padrão; CV – coeficiente de variação. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades dentro do mesmo tratamento. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Os modelos ajustados para a curva de resistência do solo à penetração mostraram, como esperado, que a RP foi negativamente correlacionada com o conteúdo de água no solo e

positivamente correlacionada com a densidade do solo para todos os tratamentos e profundidades (Tabela 18). As equações ajustadas explicaram 89, 90 e 73% da variabilidade na resistência a penetração em 0-5 cm e 89, 89 e 95% em 5-10 cm para PD, PC e PR, respectivamente. A retenção de água no solo foi positivamente correlacionada com a densidade do solo para todos os tratamentos, exceto para PR em 5-10 cm. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (1994) e Calonego e Rosolém (2011). É comum observar um aumento na retenção de água no solo associada com um aumento na Ds devido à redução na macroporosidade (Tormena et al., 1999). As equações ajustadas explicaram 94, 98, 93% da variabilidade no conteúdo de água em 0-5 cm e 92, 90 e 92% em 5-10 cm para PD, PC e PR, respectivamente (Tabela 18).

Tabela 18 – Equações ajustadas para curva de resistência do solo (CRS) e curva de retenção de água (CRA) para o experimento sistemas de preparo do solo em 0-5 e 5-10 cm

Tratamento	Equações CRS	R ²	Equações CRA	R ²
0-5 cm				
PC	$RP = 0,0111\theta^{-2,4473}Ds^{6,2500}$	0,90	$\theta = e^{(-2,2351+0,5042Ds)\Psi^{-0,1278}}$	0,98
PR	$RP = 0,0346\theta^{-1,9916}Ds^{3,9529}$	0,73	$\theta = e^{(-1,8583+0,2734Ds)\Psi^{-0,1101}}$	0,93
PD	$RP = 0,0096\theta^{-2,6527}Ds^{5,6534}$	0,89	$\theta = e^{(-2,0208+0,4502Ds)\Psi^{-0,1043}}$	0,94
5-10 cm				
PC	$RP = 0,0089\theta^{-3,0576}Ds^{4,9234}$	0,89	$\theta = e^{(-2,0600+0,6007Ds)\Psi^{-0,0531}}$	0,90
PR	$RP = 0,0216\theta^{-3,1153}Ds^{2,2854}$	0,95	$\theta = e^{(-0,9361-0,1586Ds)\Psi^{-0,0521}}$	0,92
PD	$RP = 0,0139\theta^{-3,4842}Ds^{2,6261}$	0,89	$\theta = e^{(-1,5199+0,2530Ds)\Psi^{-0,050}}$	0,92

RP- resistência à penetração; θ - conteúdo volumétrico de água; Ds- densidade do solo; Ψ - potencial de água.

O conteúdo de água na porosidade de aeração esteve consistentemente acima da capacidade de campo no IHO para os três tratamentos em 0-5 cm (Figura 24). No tratamento PD, o conteúdo de água na porosidade de aeração substituiu a capacidade de campo somente na parte final do IHO, indicando que, nesta profundidade a aeração não foi fator limitante para emergência da cultura e que a macroporosidade do solo foi suficiente para promover a troca de gases, mesmo nos maiores valores de Ds. Resultados similares foram encontrados por Kadziene et al. (2011) em um solo arenoso sob sistema PC e PD. Contudo, em 5-10 cm de profundidade, o conteúdo de água na porosidade de aeração substituiu a capacidade de campo em 50% dos valores de Ds (50% do IHO) nos tratamentos PC e PR, e nas menores Ds no tratamento PD. Os valores de densidade do solo nos quais o conteúdo de água na porosidade de aeração substituiu a capacidade de campo foram de 1,45 Mg m⁻³ no PC e 1,42 Mg m⁻³ no PR e PD. Estes resultados indicam que dentre os tratamentos, o PD foi o mais limitante com respeito à porosidade de aeração. Os resultados relatados por Olibone et al. (2010) mostrando

que a porosidade de aeração representou o limite superior do IHO em PD para a mesma profundidade corrobora os resultados do presente estudo.

O conteúdo de água na capacidade de campo foi o limite superior do IHO para todos os tratamentos em 0-5 cm, exceto na parte final do IHO no tratamento PD. O conteúdo de água na capacidade de campo, no ponto de murcha e na RP (2 MPa) aumentou com o aumento na Ds para todos os tratamentos. Como resultado, a RP substituiu o ponto de murcha e se tornou o limite inferior do IHO em todos os tratamentos. Os valores de Ds nos quais a RP se tornou o limite inferior do IHO foram de 1,30 Mg m⁻³ para PD, 1,29 Mg m⁻³ para PR e 1,21 Mg m⁻³ para PC. Estes resultados sugerem que o tratamento PC pode aumentar a suscetibilidade à compactação comparado ao PD e PR devido a Ds (1,21 Mg m⁻³) na qual a RP se tornou o limite inferior do IHO (Tabela 17). Além disso, no tratamento PC, a RP foi o limite inferior em 40% das amostras, enquanto isto foi o caso para apenas 30% das amostras em PR e PD. A RP substituiu o ponto de murcha do IHO e se tornou o limite inferior em todos os tratamentos para a camada de 5-10 cm nas seguintes densidades do solo: 1,41 Mg m⁻³ para PC, 1,42 Mg m⁻³ para PD e 1,46 Mg m⁻³ para PR. Adicionalmente, a RP foi o limite inferior em 73% das amostras no tratamento PC, 86% no PD e 37% em PR. Para a profundidade de 5-10 cm estes resultados indicam que o tratamento PR foi menos suscetível à compactação que PC e PD.

A resistência do solo à penetração tem sido constantemente associada como o limite inferior do IHO (SILVA et al., 2011; SILVA et al., 1994). O decréscimo no conteúdo de água na porosidade de aeração e o aumento da umidade em que a RP atinge o valor crítico com a Ds (Figura 24) indica que um aumento na Ds aumenta coesão das partículas e diminui a macroporosidade do solo, reduzindo aeração e aumentando os riscos de excessiva resistência do solo à penetração. Estes resultados indicam que o IHO foi mais sensível para avaliar as mudanças na estrutura do solo do que a retenção e disponibilidade de água. Corroboram este fato os resultados encontrados por Kaufman et al. (2010) e Olibone et al. (2010).

Figura 24 – Variação no conteúdo de água com a densidade do solo em 0-5 e 5-10 cm de profundidade para o experimento sistemas de preparo do solo

Neste experimento, a Dsc ocorreu somente na camada 5-10 cm e foi de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ para PC e PD, e $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PR. Como a ocorrência de $D_s > D_{sc}$ é considerada um sinal de degradação do solo (SILVA et al., 1994), o tratamento PR pode ser considerado um sistema de preparo mais adequado que PC e PD para a camada 5-10 cm. A ausência de $D_s > D_{sc}$ para a camada 0-5 cm sugere que provavelmente não houve impedimentos para a emergência da cultura. Em contraste, a existência de $D_s > D_{sc}$ para 5-10 cm sugere uma possível limitação para o desenvolvimento radicular da cultura, indicando a ocorrência de um gradiente físico no solo. Muitos autores têm associado a ocorrência de Dsc em solos cultivados, como um resultado do manejo inadequado do solo (BENJAMIN et al., 2003; OLIBONE et al., 2010; MEDEIROS et al., 2011).

O IHO foi positivamente correlacionado com a D_s até $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$ para o PC e $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ para PR e PD na camada 0-5 cm (Figura 25). O tratamento PC foi associado com um maior IHO que PR e PD em D_s menores que $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$. Contudo, em D_s acima de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$, o PC teve um menor IHO e decresceu mais acentuadamente com o aumento da densidade do solo que o PR e PD. Estes resultados indicam que PD e PR levaram a um maior conteúdo de água que PC em maiores valores de D_s , estando de acordo com os resultados relatados por Tormena et al. (1999).

A relação entre IHO e D_s foi similar para os tratamentos PD e PR. O IHO foi negativamente correlacionado com a D_s na camada de 5-10 cm para todos os tratamentos (Figura 25). O maior IHO foi encontrado em D_s relativa de 0,76 para o PC, 0,82 para o PR e 0,85 para o PD na camada 0-5 cm. Na camada 5-10 cm, o IHO começou a decrescer a partir de D_s relativa de 0,88 para PC e PR, e 0,91 para PD. Os valores de D_s relativa nos quais o IHO foi zero foram 0,93, 0,97 e 0,99, respectivamente, para PC, PR e PD na camada 5-10 cm. Estes resultados mostram que o sistema PC pode ser mais sensível a um aumento na D_s que os sistemas PR e PD em ambas as profundidades.

Os tratamentos PD e PR foram associados com maior disponibilidade de água que o tratamento PC, mesmo em altos valores de D_s relativa. Considerando a faixa de ótimos valores de D_s relativa descritos na literatura varia de 0,77 a 0,90 (CARTER, 1990; HAKANSSON, 1990; REICHERT et al. 2009), verifica-se que os valores médios de D_s relativa para a camada 0-5 cm foram de 0,73 no PC, 0,77 no PR e 0,82 no PD e na camada 5-10 cm foram de 0,87 no PC, 0,90 no PR e 0,98 no PD. Estes valores encontram-se dentro daquela faixa, exceto para PC em 0-5 cm e PD em 5-10 cm. O reduzido valor observado para o tratamento PC indica que a excessiva porosidade pode dificultar o estabelecimento da cultura, assim como o alto valor em PD, devido à excessiva compactação do solo, a qual

resulta em menor macroporosidade e elevada resistência do solo à penetração. Contudo, em PD, valores de IHO maiores que zero foram observados até o valor de D_s relativa de 0,98 (Figura 25). A disponibilidade de água em PD, mesmo em altos valores de D_s , sugeriram que o uso do PD por longo tempo melhorou a estrutura do solo e rede de macroporos. Blanco-Canqui et al. (2009) avaliaram a D_s máxima para o mesmo experimento e observaram que o PD reduziu a suscetibilidade do solo a compactação pelo aumento no carbono orgânico do solo comparado aos sistemas PC e PR.

Figura 25 – Variação do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO) em função da densidade do solo e da densidade do solo relativa para a camada de 0-5 e 5-10 cm de profundidade para os sistemas de preparo do solo

Os tratamentos não afetaram o IHO médio do solo para a camada 0-5 cm (Figura 26). Os valores médios de IHO em 0-5 cm foram $0,10 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para PD e $0,11 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$ para PR e PC.

A ausência de efeitos dos sistemas de preparo do solo no IHO indica que a disponibilidade de água para a emergência de trigo não diferiu dentre os sistemas de manejo utilizados. Esta falta de diferenças no IHO podem também ser devido a mobilização do solo durante a semeadura, a qual muito provavelmente reduziu as diferenças nas propriedades do solo ao longo dos sistemas de preparo. O IHO médio foi 40% maior em PC e PR que em PD na camada de 5-10 cm. Estudos anteriores também encontraram diferenças nos valores de IHO entre sistemas de preparo do solo (TORMENA et al., 1999; MEDEIROS et al., 2011). Embora os valores de IHO e Ds indicam que PD e PR tiveram maior disponibilidade de água para o crescimento das plantas que o tratamento PC (Figura 25). Isto pode estar associado com a presença de mais resíduos superficiais em PD e PR, os quais contribuem para melhores condições do solo para produção das culturas. Contudo, os maiores valores médios de IHO encontrados para 5-10 cm em PR e PC indicam uma melhor condição física do solo nesta profundidade, provavelmente devido a uma camada compactada sob PD. Em geral, os resultados indicam que o tratamento PR teve condições físicas da cama de semeadura do solo mais favoráveis que o PD e PC. O excessivo preparo na camada 0-5 cm em PC e a camada compactada em 5-10 cm em PD contribuíram para um limitado IHO nestes tratamentos.

Os limites superiores e inferiores indicaram um estreito IHO para todos os tratamentos, especialmente na camada 5-10 cm. Isto sugere que a condição física pode ser um fator limitante neste solo. Outros estudos em regiões semi-áridas também observaram um estreito IHO (SILVA et al., 2011; GATHALA et al., 2011), porém muitos estudos em regiões com alta precipitação encontraram um IHO mais amplo do que neste estudo (GARTZIA-BENGOETXEA et al., 2009; OLIBONE et al., 2010).

Figura 26 – Valores médios do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO) para os sistemas de preparo do solo. PD – plantio direto, PC – preparo convencional, PR – preparo convencional

2.3.3 Experimento Sistemas de cultivo do solo – EUA

2.3.3.1 Parâmetros de emergência, conteúdo de água e resistência do solo à penetração para a cama de semeadura da cultura do trigo – 2011

Para o experimento sistemas de cultivo a emergência do trigo (plantas m⁻¹) para o PD foi maior na maioria dos dias em TP e TSP que em TT (Tabela 19). Já para o sistema PR não houve diferenças significativas dentre os sistemas de cultivo. Nos sistemas de cultivo TP e TSP a emergência de trigo (plantas m⁻¹) foi maior em PD do que sob PR. Por outro lado no sistema de cultivo TT foi significativamente maior em PR do que em PD.

Tabela 19 – Valores médios de emergência de trigo (plantas m⁻¹) do oitavo ao décimo terceiro dia após semeadura

DAS	Plantio Direto			Preparo Reduzido		
	TP	TSP	TT	TP	TSP	TT
8º	2 a	2 aA	0 a	0 a	0 aB	1 a
9º	7 aA	7 aA	1 b	1 bB	2 bB	3 a
10º	20 aA	20 a	5 bB	10 aB	14 a	15 aA
11º	28 aA	30 a	16 bB	21 aB	26 a	25 aA
12º	33 a	37 a	26 bB	32 a	34 a	33 aA
13º	34 a	37 a	32 a	33 a	36 a	34 a

DAS – dias após semeadura, TP- trigo/pousio, TSP- trigo/sorgo/pousio, TT- trigo contínuo. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

O parâmetro IVE seguiu a mesma tendência que os valores de emergência (plantas m⁻¹). Todavia, a taxa de emergência não apresentou diferenças ao longo dos sistemas de cultivo e preparo, uma vez que é calculada de acordo com o número final de plantas emergidas, o qual também não apresentou diferenças estatísticas (Figura 27). O menor IVE encontrado para o sistema TT em PD se deve provavelmente à maior produção de biomassa e cobertura do solo no sistema de cultivo contínuo (TT), favorecendo dessa forma a ocorrência de menores temperaturas, o que consequentemente resulta em uma menor velocidade de emergência. Por outro lado, o maior IVE para os sistemas de cultivo com fase pousio (TP e TSP) em relação ao TT em PD e pode ser associado com a menor temperatura do solo causada pelo menor acúmulo de resíduos nesses sistemas. Já os maiores IVE's encontrados nos sistemas de cultivo sob PD do que em PR pode ser atribuído ao melhor contato solo-semente promovidos pelo PD comparado ao PR. Bordovsky et al. (1998) observaram que o pobre contato solo-semente em sistemas que envolvem preparo do solo podem resultar em decréscimo na emergência das culturas.

Figura 27 – Valores médios da taxa de emergência (%) e índice de velocidade de emergência (IVE) para a cama de semeadura da cultura do trigo 2011. PC – preparo convencional, PR – preparo reduzido, PD - plantio direto. Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

Para a maioria dos dias medidos (13 dias) não houve diferenças significativas entre os sistemas de cultivo sob PD com relação ao conteúdo volumétrico de água no solo (Tabela 20). Como resultado o valor médio do conteúdo de água relativo aos 13 dias avaliados também não apresentou diferenças. Os sistemas de cultivo sob PR seguiram a mesma tendência apresentada sob PD. Na comparação dos sistemas de cultivo entre os sistemas de preparo, os sistemas TP e TT tiveram conteúdo de água significativamente maiores sob PD do que em PR (Tabela 20). Isso demonstra que o PD foi mais eficiente em manter a umidade no solo do que o PR. De maneira geral, os sistemas de cultivo sob PD apresentaram conteúdo de água 20% maior que o PR. Unger e Jones (1988) também obtiveram um maior conteúdo de água medido no campo para o PD comparado aos outros sistemas de manejo.

A resistência do solo à penetração para os sistemas de cultivo sob PR foi significativamente maior que os sistemas de cultivo sob PD (Tabela 20). Resultados semelhantes foram obtidos por Blanco-Canqui et al. (2010) quando avaliaram a RP para o mesmo experimento. Os resultados de conteúdo de água e RP mostram que os sistemas de cultivo sob PD, de forma geral, apresentaram melhores condições físicas para a cama de semeadura do trigo. Portanto, acredita-se que os maiores índices de emergência obtidos nos sistemas de cultivo sob PD sejam reflexo disso.

Tabela 20 – Valores médios diários de conteúdo de água e resistência à penetração da cama de semeadura da cultura do trigo 2011 sob sistemas de cultivo e manejo do solo

DAS	Plantio direto			Preparo reduzido		
	TP	TSP	TT	TP	TSP	TT
Conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)						
1º	0,34 aA	0,31 b	0,33 aA	0,29 aB	0,30 a	0,26 bB
2º	0,34 aA	0,31 b	0,34 aA	0,29 aB	0,29 a	0,27 aB
3º	0,32 aA	0,29 b	0,31 abA	0,28 aB	0,28 a	0,26 aB
4º	0,31 aA	0,29 a	0,31 aA	0,27 aB	0,28 a	0,26 aB
5º	0,30 aA	0,27 a	0,29 aA	0,23 aB	0,25 a	0,24 aB
6º	0,30 aA	0,27 a	0,28 aA	0,24 aB	0,24 a	0,24 aB
7º	0,29 abA	0,27 b	0,30 aA	0,24 bB	0,27 a	0,24 bB
8º	0,28 aA	0,27 a	0,29 aA	0,23 aB	0,24 a	0,25 aB
9º	0,28 aA	0,26 a	0,28 aA	0,23 abB	0,25 a	0,22 bB
10º	0,28 aA	0,26 a	0,27 aA	0,22 abB	0,24 a	0,21 bB
11º	0,28 aA	0,27 a	0,30 aA	0,23 aB	0,25 a	0,22 aB
12º	0,29 aA	0,26 a	0,29 aA	0,22 abB	0,25 a	0,21 bB
13º	0,29 aA	0,26 a	0,26 aA	0,22 abB	0,24 a	0,21 bB
Média geral	0,30 aA	0,30 aA	0,30 aA	0,25 a B	0,24 aB	0,24 aB
Resistência à penetração (MPa)						
1º	1,73 c	1,73 c	1,74 c	1,93 b	2,01 ab	2,06 a
2º	1,72 b	1,79 b	1,76 b	2,01 a	2,08 a	2,12 a
3º	1,84 b	1,87 b	1,88 b	1,99 a	2,07 a	2,07 a
4º	1,90 c	1,95 bc	1,94 bc	2,12 ab	2,20 a	2,21 a
5º	1,98 b	2,04 b	2,03 b	2,44 a	2,40 a	2,39 a
6º	2,05 b	2,14 b	2,15 b	2,43 a	2,49 a	2,44 a
7º	2,24 b	2,20 b	2,16 b	2,49 a	2,47 a	2,50 a
8º	2,34 b	2,32 b	2,27 b	2,64 a	2,60 a	2,59 a
9º	2,36 b	2,49 b	2,38 b	2,76 a	2,74 a	2,84 a
10º	2,53 b	2,65 b	2,57 b	2,94 a	2,88 a	3,00 a
11º	2,66 b	2,60 b	2,55 b	3,12 a	3,15 a	3,21 a
12º	2,74 b	2,72 b	2,74 b	3,26 a	3,31 a	3,36 a
13º	2,68 b	2,70 b	2,67 b	3,10 a	3,12 a	3,16 a
Média geral	2,21 b	2,24 b	2,22 b	2,56 a	2,58 a	2,61 a

DAS – dias após semeadura, PC – preparo convencional, PR – preparo reduzido, PD - plantio direto. Letras minúsculas comparam os tratamentos dentro do mesmo dia. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%

2.3.3.2 Intervalo Hídrico Ótimo do Solo

Os parâmetros de estatística descritiva para o experimento sistemas de cultivo são mostrados na Tabela 21. De forma semelhante ao experimento sistemas de preparo, a Ds foi a propriedade de menor variabilidade. Os CV's para a Ds variaram de 5,39 a 11,51% na camada 0-5 cm e de 2,63 a 5,37% na camada 5-10 cm. Outros estudos encontraram também baixa variabilidade para a Ds, indicando ser esta uma característica intrínseca desta propriedade (FIDALSKI et al., 2010; BLAINSKI et al., 2012). O conteúdo volumétrico de água no solo

novamente apresentou uma variabilidade intermediária em relação a Ds e a RP. O maior CV registrado para o conteúdo de água foi de 32,17% no sistema de cultivo trigo contínuo sob preparo reduzido na camada 0-5 cm. A RP foi a propriedade que apresentou maior variabilidade, com CV's desde 32,74% para o sistema TT sob PD na camada 5-10 até 89,17% para o sistema TSP sob PD na camada 0-5 cm. De maneira geral, ao longo das três propriedades avaliadas, os sistemas de cultivo sob preparo reduzido apresentaram maiores CV's que os sistemas sob plantio direto. Isto significa que mesmo a mínima mobilização proporcionada no sistema de preparo reduzido ocasiona um aumento da variabilidade das propriedades do solo. Já dentre os sistemas de cultivo, a sequência trigo-sorgo-pousio tendeu a apresentar maiores CV's (Tabela 21). Provavelmente os diferentes sistemas radiculares envolvidos nesta rotação tenham favorecido esta maior variabilidade encontrada quando comparado às rotações trigo-pousio e trigo contínuo. Similarmente ao experimento sistemas de preparo, a camada 5-10 cm apresentou menores CV's em relação à camada 0-5 cm, provavelmente devido às mesmas razões anteriormente atribuídas.

Os sistemas de cultivo não afetaram a Ds, mas os sistemas de preparo apresentaram efeito para a camada 0-5 cm (Tabela 21). O plantio direto apresentou maior Ds que o preparo reduzido para o sistema de cultivo trigo contínuo (TT). Na camada 5-10 cm, a Ds foi menor no TT em PR que nos outros tratamentos. Os sistemas de cultivo intensivos mostraram reduzir a Ds comparado aos outros sistemas de cultivo que incluíam a fase pousio, como também constatado por Blanco-Canqui et al. (2010). Os sistemas de cultivo não tiveram efeitos sobre a retenção de água e RP em ambas as profundidades, apesar do longo tempo de duração do experimento (35 anos) (Tabela 21). Outros estudos nesta mesma região encontraram pouca ou nenhuma diferença nas propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas que incluíam o trigo (BENJAMIN et al., 2007; BLANCO-CANQUI et al., 2010).

Tabela 21 – Estatística descritiva para as variáveis densidade do solo (Ds, Mg m⁻³), conteúdo de água (θ , m³ m⁻³) e resistência à penetração (RP, MPa) da cama de semeadura da cultura do trigo em 2011 (Experimento sistemas de cultivo)

Variável	Média	DP	CV	Mínimo	Máximo
0-5 cm					
Trigo-pousio/ Plantio direto					
Ds	1,27 a	0,11	8,46	1,10	1,44
θ	0,36	0,07	20,51	0,28	0,51
RP	0,78	0,42	54,09	0,17	1,71
Trigo-sorgo-pousio/ Plantio direto					
Ds	1,28 a	0,07	5,39	1,18	1,45
θ	0,35	0,08	21,91	0,26	0,50
RP	0,96	0,85	89,17	0,24	3,85
Trigo-trigo/ Plantio direto					
Ds	1,27 aA	0,10	7,51	1,00	1,41
θ	0,34	0,08	24,18	0,23	0,50
RP	1,04	0,61	59,08	0,41	2,27
Trigo-pousio/ Preparo reduzido					
Ds	1,21 a	0,10	8,33	1,09	1,38
θ	0,33	0,09	28,12	0,23	0,52
RP	0,70	0,39	55,60	0,19	1,42
Trigo-sorgo-pousio/ Preparo reduzido					
Ds	1,22 a	0,14	11,51	1,01	1,41
θ	0,34	0,10	29,51	0,23	0,56
RP	0,89	0,70	78,56	0,08	2,93
Trigo-trigo/ Preparo reduzido					
Ds	1,20 aB	0,09	7,89	1,10	1,43
θ	0,34	0,11	32,17	0,24	0,57
RP	0,73	0,36	48,74	0,10	1,36
5-10 cm					
Trigo-pousio/Plantio direto					
Ds	1,47 ab	0,04	2,63	1,38	1,53
θ	0,40	0,04	9,88	0,35	0,47
RP	1,20	0,47	38,75	0,57	2,00
Trigo-sorgo-pousio/Plantio direto					
Ds	1,48 a	0,06	4,00	1,34	1,57
θ	0,40	0,05	11,84	0,30	0,48
RP	1,33	0,68	50,90	0,60	2,93
Trigo-trigo/Plantio direto					
Ds	1,46 abc	0,04	2,89	1,38	1,52
θ	0,38	0,04	10,42	0,34	0,46
RP	1,18	0,39	32,74	0,63	2,12
Trigo-pousio/Preparo reduzido					
Ds	1,41 bc	0,08	5,37	1,28	1,51
θ	0,38	0,06	14,94	0,29	0,49
RP	1,22	0,82	66,73	0,57	3,89
Trigo-sorgo-pousio/ Preparo reduzido					
Ds	1,40 cd	0,07	4,85	1,29	1,52
θ	0,38	0,05	14,38	0,31	0,48
RP	1,32	0,74	55,71	0,57	3,34
Trigo-trigo/ Preparo reduzido					
Ds	1,34 d	0,06	4,45	1,26	1,47
θ	0,37	0,06	17,35	0,27	0,49
RP	1,11	0,46	41,61	0,53	2,10

DP - desvio padrão; CV – coeficiente de variação. Letras maiúsculas comparam os tratamentos dentro da mesma profundidade, e letras minúsculas comparam as profundidades dentro do mesmo tratamento. Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A tabela 22 mostra as equações ajustadas para a RP e retenção de água no solo baseadas na densidade do solo e potencial de água, respectivamente. A RP foi negativamente correlacionada com o conteúdo de água e positivamente correlacionada com a Ds para todos os tratamentos e profundidades. De maneira similar ao experimento sistemas de preparo, o conteúdo de água foi positivamente correlacionado com o potencial mátrico e Ds, exceto em TP sob PR na camada 5-10 cm. O efeito positivo da densidade do solo na retenção de água foi similar aos resultados encontrados por Tormena et al. (1999) e Benjamin et al. (2003). As equações ajustadas explicaram de 80 a 97% e 76 a 94% da variabilidade na resistência à penetração, e 79 a 90% e 81 a 92% da variabilidade no conteúdo de água para as camadas de 0-5 cm e 5-10 cm, respectivamente.

Tabela 22 – Equações ajustadas para curva de resistência do solo (CRS) e curva de retenção de água (CRA) para o experimento sistemas de cultivo do solo em 0-5 e 5-10 cm

Tratamento		Equações CRS		r ²	Equações CRA		r ²
0-5 cm							
PD	TP	RP = 0,00530 ^{-3,2875} Ds ^{5,7430}		0,93	$\theta = e^{(-1,5431+0,2383Ds)} \Psi^{-0,0658}$		0,90
	TSP	RP = 0,00280 ^{-3,6907} Ds ^{6,1674}		0,97	$\theta = e^{(-1,6512+0,2822 Ds)} \Psi^{-0,0728}$		0,90
	TT	RP = 0,01200 ^{-2,5406} Ds ^{6,3260}		0,86	$\theta = e^{(-2,1048+0,61974 Ds)} \Psi^{-0,0710}$		0,89
PR	TP	RP = 0,01020 ^{-2,6478} Ds ^{5,7306}		0,90	$\theta = e^{(-2,2453+0,73164 Ds)} \Psi^{-0,0750}$		0,89
	TSP	RP = 0,00380 ^{-3,3839} Ds ^{6,4406}		0,92	$\theta = e^{(-2,2372+0,7026 Ds)} \Psi^{-0,0876}$		0,84
	TT	RP = 0,02490 ^{-2,2152} Ds ^{4,2762}		0,80	$\theta = e^{(-1,4625+0,0416 Ds)} \Psi^{-0,0975}$		0,79
5-10 cm							
PD	TP	RP = 0,01430 ^{-4,1361} Ds ^{1,3691}		0,85	$\theta = e^{(-0,7602-0,1827 Ds)} \Psi^{-0,0341}$		0,92
	TSP	RP = 0,01820 ^{-3,2388} Ds ^{3,1075}		0,94	$\theta = e^{(-1,1720+0,0941 Ds)} \Psi^{-0,0391}$		0,86
	TT	RP = 0,00790 ^{-3,3687} Ds ^{4,4192}		0,76	$\theta = e^{(-1,7128+0,4452 Ds)} \Psi^{-0,0309}$		0,86
PR	TP	RP = 0,00540 ^{-4,0641} Ds ^{3,7914}		0,94	$\theta = e^{(-1,4108+0,2196 Ds)} \Psi^{-0,0457}$		0,81
	TSP	RP = 0,01200 ^{-2,8196} Ds ^{5,4665}		0,87	$\theta = e^{(-1,4950+0,2734 Ds)} \Psi^{-0,0449}$		0,85
	TT	RP = 0,02310 ^{-2,6502} Ds ^{3,8848}		0,92	$\theta = e^{(-1,2828+0,0901 Ds)} \Psi^{-0,0559}$		0,91

PD- plantio direto; PR- preparo reduzido; TP- trigo/pousio; TSP- trigo/sorgo/pousio; TT- trigo contínuo; RP- resistência à penetração; θ - conteúdo volumétrico de água; Ds- densidade do solo; Ψ - potencial de água.

No limite superior o IHO foi mais dependente do conteúdo de água na capacidade de campo e no inferior da RP para todos os tratamentos em 0-5 cm, exceto para TP sob PR (Figura 28). O conteúdo de água na capacidade de campo foi o limite superior do IHO para TP e TT sob PR e TT em PD, indicando que a aeração não limitante nestes tratamentos. Em contraste, para TP e TSP sob PR e TSP em PD, a porosidade de aeração substituiu a capacidade de campo em valores de Ds acima de 1,39; 1,40 e 1,39 Mg m⁻³, respectivamente. O conteúdo de água na capacidade de campo e ponto de murcha aumentou com um aumento na Ds para todos os tratamentos.

O conteúdo de água na RP aumentou, enquanto a porosidade de aeração decresceu com um aumento na Ds para todos os tratamentos. Estes resultados estão de acordo com aqueles relatados por Silva et al. (1994), Tormena et al. (1999) e Olibone et al. (2010). O IHO foi considerado ideal para TP sob PR por que foi igual à água disponível. Poucos estudos encontraram IHO ideal, pois o mesmo é frequentemente limitado pela aeração e RP (TORMENA et al., 2007; MIRETTI et al., 2010), ou somente pela RP (MEDEIROS et al., 2011; KADZIENE et al., 2011).

A resistência à penetração substituiu a o ponto de murcha e se tornou o limite inferior do IHO em valores de Ds acima de 1,39; 1,34 e 1,33 Mg m^{-3} para TP, TT e TSP em PD, e acima de 1,33 e 1,30 Mg m^{-3} para TT e TSP sob PR, respectivamente. Estes valores de Ds foram maiores que os valores médios para todos os tratamentos (Tabela 21), embora estes valores tenham sido próximos aos valores médios para TSP sob PR e PD. Estes resultados indicam que a RP foi um fator limitante neste solo e foram similares a aqueles encontrados por Benjamin et al. (2003) para a mesma região de estudo e aos de Silva et al. (2011) para uma região semi-árida do Brasil. Adicionalmente, em relação à limitação pela RP, o TT sob PR foi o tratamento associado com a menor porcentagem (7%) de amostras mostrando o conteúdo de água na resistência à penetração como o limite inferior do IHO, seguido pelo TT, TP e TSP sob PD com 13%, e TSP sob PD com 33%.

Na camada 5-10 cm o IHO foi afetado pelo conteúdo de água na porosidade de aeração e ponto de murcha (Figura 29). Nesta profundidade, todos os sistemas de cultivo sob PD tiveram o conteúdo de água no ponto de murcha como o limite inferior do IHO. Contudo, para o TP e TSP, a porosidade de aeração foi o limite superior para toda a extensão do IHO, enquanto para o TT, 87% das amostras tiveram a porosidade de aeração como limite superior do IHO. Estes resultados indicam que a aeração foi limitante em 5-10 cm sob PD, especialmente para TP e TSP. Sob o PR, a porosidade de aeração substituiu a capacidade de campo como o limite superior do IHO em valores de Ds de 1,42 Mg m^{-3} para TP, 1,37 Mg m^{-3} para TT e 1,39 Mg m^{-3} para TSP. Para as rotações TP e TSP, 60% das amostras tiveram a porosidade de aeração como limite superior, enquanto em TT somente 20%. Estes resultados indicam que embora a porosidade de aeração tenha substituído a capacidade de campo em maiores valores de Ds em TP e TSP que em TT, este último sistema de cultivo foi menos limitante em relação à aeração.

Figura 28 – Variação no conteúdo de água com a densidade do solo em 0-5 cm de profundidade para o experimento sistemas de cultivo do solo

Figura 29 – Variação no conteúdo de água com a densidade do solo em 5-10 cm de profundidade para o experimento sistemas de cultivo do solo

A resistência do solo a penetração substituiu o ponto de murcha se tornando o limite inferior do IHO em valores de D_s de 1,48; 1,43 e 1,44 Mg m^{-3} para TP, TSP e TT, respectivamente. O sistema de cultivo TT foi menos limitante na RP com somente 7% das amostras tendo a RP como limite inferior, enquanto TP e TSP tiveram 13 e 33%, respectivamente, das amostras com RP como limite inferior. Adicionalmente, ao longo dos diferentes sistemas de cultivo e preparo em 5-10 cm não houve ocorrência de IHO igual a zero somente para o TT sob PR.

A figura 30 mostra que o IHO foi positivamente correlacionado com o aumento na D_s até 1,31 Mg m^{-3} para TSP e 1,29 Mg m^{-3} para TT sob PR na camada 0-5 cm. Para o sistema de cultivo TP sob PR, o IHO foi positivamente correlacionado com todos os valores de D_s . No sistema PD, o IHO aumentou até valores de D_s de 1,31; 1,37 e 1,24 Mg m^{-3} para TSP, TT e TP, respectivamente. Considerando os mesmos valores de densidade do solo para ambos os sistemas de preparo, o TT e TSP tiveram um maior IHO que o TP na camada 0-5 cm (Figura 30). Então, TP pode ser considerado o menos favorável sistema de cultivo mesmo tendo tido o IHO ideal. Sob PD, as curvas da relação entre IHO e densidade do solo foram similares para os sistemas de cultivo TT e TSP.

Na camada 5-10 cm o IHO foi negativamente correlacionado com a D_s para todos os sistemas de cultivo sob PD (Figura 30). Sob PR, esta relação foi negativa a partir de valores de D_s de 1,39 Mg m^{-3} para TSP, 1,43 Mg m^{-3} para TT e 1,42 Mg m^{-3} para TP. Estes resultados indicam que mesmo com o PR tendo apresentado uma negativa relação entre IHO e D_s , os sistemas de cultivo sob este sistema de preparo apresentaram melhor IHO que os sistemas de cultivo sob PD, e dentre os sistemas de cultivo sob PR, o TT apresentou maior IHO que TSP e TP.

Os resultados mostram que não ocorreu D_s crítica para os tratamentos em 0-5 cm, enquanto na camada de 5-10 cm o mesmo não foi observado somente para TT sob PR. A existência da $D_s > D_{sc}$ está relacionada à degradação da estrutura do solo (SILVA et al., 1994). Alguns trabalhos feitos em solos intensivamente cultivados também encontraram D_s crítica (LEÃO et al., 2006; SILVA et al., 2011). A ausência de D_s crítica em 0-5 cm indica uma melhor condição física para a cama de semeadura nesta profundidade do que na camada 5-10 cm.

Figura 30 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo para o experimento sistemas de cultivo nas camadas 0-5 e 5-10 cm

A relação entre IHO e Ds relativa em 0-5 cm mostrou que o PR teve os maiores valores de IHO em Ds relativas de 0,86 para TSP e 0,88 para TT, enquanto para o sistema de cultivo TP, o IHO aumentou exponencialmente até Ds relativa de 0,87 (Figura 31). Sob PD, os maiores de valores de IHO foram encontrados em Ds relativas de 0,86 para TSP, 0,91 para TT e 0,78 para TP. O sistema de cultivo TT em ambos os sistemas de preparo foi associado com maiores valores de Ds relativa nos quais ocorreram os maiores valores de IHO. Na camada 5-10 cm sob PR, a Ds relativa na qual o IHO foi igual a zero foi 0,98 para o TSP e 0,96 para o TP, enquanto o TT não apresentou IHO igual a zero. Para o sistema PD, estes valores foram 0,93 para TSP e TP, e 0,96 para TT (Figura 31).

Figura 31 – Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em função da densidade do solo relativa para o experimento sistemas de cultivo nas camadas 0-5 e 5-10 cm

Os valores médios de D_s relativa em 5-10 cm foram maiores em sob PD (0,95 para todos os sistemas de cultivo) que em PR (0,90 para TSP, 0,87 para TT e 0,91 para TP). O mesmo padrão foi encontrado em 0-5 cm, onde a D_s relativa média foi de 0,84 para TSP, 0,86 para TT e 0,80 para TP sob PD. Enquanto sob PR os valores médios de D_s relativa foram 0,80; 0,81 e 0,76, respectivamente, para TSP, TT e TP. Os valores de D_s relativa para as duas profundidades estão de acordo com a faixa de ótimos valores descrita na literatura (Carter, 1990; Hakansson, 1990; Reichert et al., 2009), exceto para os sistemas de cultivo sob PD na camada 5-10 cm, para os quais os valores de médios de D_s relativa são muito próximos daqueles onde o IHO foi igual a zero. A melhor relação entre IHO e D_s relativa foi observada para o sistema de cultivo TT em ambos os sistemas de preparo e profundidades. Resultados

similares foram encontrados por Blanco-Canqui et al. (2010), que relataram que sistemas de cultivo contínuos podem reduzir os riscos de compactação do solo comparado a sistemas de cultivo com a fase pousio, devido ao maior retorno de resíduos que consequentemente contribuem para melhoria da qualidade física do solo.

Os sistemas de cultivo e preparo tiveram significativos efeitos no IHO médio e a interação sistemas de cultivo x preparo foi significativa. Os valores médios de IHO dentre os sistemas de cultivo não diferiram em ambas as profundidades. Enquanto o IHO médio em TT foi maior que em TSP e TP sob PR para as duas profundidades (Figura 32). Isto sugere que o sistema de cultivo trigo contínuo pode aumentar a disponibilidade de água e melhorar a condição física do solo para crescimento das plantas. Sistemas contínuos de cultivo têm sido relatados ser responsáveis pelo aumento na agregação e no armazenamento de carbono orgânico em relação a sistemas de cultivo envolvendo pousio (BLANCO-CANQUI et al., 2011). O IHO médio em PR foi maior que em PD para todos os sistemas de cultivo e profundidade, exceto para TSP em 0-5 cm. O IHO médio foi 1,2 vezes maior em PR que em PD na camada 0-5 cm e 4,7 vezes maior na camada 5-10 cm. Os menores valores de IHO foram observados para TSP e TP que para TT sob PR em ambas as profundidades (Figura 32), sugerindo que sistemas de cultivo incluindo a fase pousio podem limitar a disponibilidade de água para o crescimento das plantas comparado a sistemas de cultivo contínuos. Isto corrobora com estudos anteriores que relataram que sistemas de cultivo com pousio podem não ser uma boa opção para armazenamento de água no solo (LARNEY; LINDWALL, 1995; THOMPSON, 2001; BLANCO-CANQUI et al., 2010). De maneira similar ao experimento sistemas de preparo, o estreito IHO observado para todos os sistemas de cultivo pode refletir a limitada disponibilidade de água em regiões semi-áridas (UNGER; VIGIL, 1998; SHAVER et al., 2003). Estes resultados estão também de acordo com aqueles encontrados por Silva et al. (2011) e Gathala et al. (2011) quem encontraram estreitos IHO em regiões semi-áridas.

Figura 32 – Valores médios do intervalo hídrico ótimo do solo (IHO) para os sistemas de cultivo do solo. TP- trigo/pousio, TSP- trigo/sorgo/pousio, TT- trigo contínuo

2.3.4 Relações entre os parâmetros de emergência das culturas e as propriedades do solo

O procedimento *boundary line* foi aplicado para modelar as relações entre os parâmetros de emergência (IVE e TE) e as propriedades físicas do solo (RP, θ , Ds, RT, F, EA, Ksat, Ka, IHO, Carbono orgânico) obtidas na cama de semeadura do milho e da soja, e entre as propriedades físicas do solo (RP, θ , Ds, IHO) avaliadas para a cama de semeadura do trigo nos experimentos dos EUA. Todavia, serão mostradas e discutidas somente as regressões as quais foram estatisticamente significativas a um nível de probabilidade menor igual a 0,1. Para a maioria dos *boundary* pontos a função polinomial quadrática mostrou-se como a mais adequada ao ajuste, enquanto para o restante o modelo de regressão linear foi o mais apropriado.

2.3.4.1 Cama de semeadura da cultura do milho – 2009

De forma geral, os gráficos de dispersão plotados entre parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo exibiram um formato curvilíneo, com exceção da RP e θ medidos no campo (Figura 33). O IVE foi forte e negativamente relacionado com os valores médios de RP e θ medidos ao longo da cama de semeadura do milho. Isso indica que a velocidade de emergência do milho decresceu com o aumento da RP e do θ . Corroboram os resultados de RP os encontrados por Weaich et al. (1992) que observaram uma redução na elongação foliar

em milho com o aumento da RP. De maneira contrária ao resultado encontrado para θ foram os resultados encontrados por Ferraris (1992) que obtiveram uma positiva correlação linear entre a taxa de emergência de sorgo e girassol e o conteúdo de água no solo. No entanto, vale ressaltar que ocorreram valores muito altos de θ , que variou de 0,35 a 0,48 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para os *boundary* pontos. Isso indica que a umidade excessiva do solo pode prejudicar a velocidade de emergência da cultura. Estes altos teores de conteúdo de água estão coerentes com a alta pluviosidade ocorrida para a cama de semeadura do milho em 2009. Tanto a RP quanto a θ explicaram 86% da variabilidade do IVE. Silva et al. (2004) encontraram que somente 43% da variabilidade no parâmetro altura de plantas de milho foi explicada pela RP através de uma relação negativa entre essas variáveis. Para o parâmetro TE não houve ajuste significativo aos *boundary* pontos entre a RP e θ .

O IVE apresentou uma forte correlação inicial com a Ds, apresentando uma maior resposta entre valores de Ds de 0,88 a 1,08 Mg m^{-3} (Figura 33). Acima de 1,08 Mg m^{-3} o IVE mostrou diminuição em função do aumento da Ds, no entanto, de forma menos pronunciada do que quando a relação foi positiva. A TE apresentou valor de 83% em Ds igual a 0,88 Mg m^{-3} e 100% para todos os outros valores de Ds. Isso indica que a taxa de emergência foi menos sensível ao aumento na Ds que o IVE. Uma possível explicação para isso é que os valores de TE representam os valores finais de plantas emergidas, enquanto o IVE leva em conta no seu cálculo os valores diários de emergência. Cerca de 72% da variabilidade em IVE e 76% em TE foi explicada pela densidade do solo. Vyn e Raimbult (1993) também obtiveram uma significativa e negativa relação entre Ds e parâmetro da cultura, todavia a variável avaliada por eles foi a altura de plantas de milho.

O modelo de regressão ajustado aos *boundary* pontos de resposta do IVE para a estabilidade de agregados indica que o IVE foi maximizado até valores de EA de cerca de 30 ml min^{-1} . Contudo o modelo foi fortemente afetado por pequenas mudanças em EA acima do valor ótimo. O valor de EA até onde a TE foi positivamente correlacionada foi semelhante ao valor do IVE. No entanto, o aumento em EA trouxe um declínio mais abrupto em TE do que em IVE. O IVE e o TE apresentaram uma relação semelhante com a EA. O maior valor do coeficiente de determinação foi obtido pela relação entre TE e EA (0,91).

O IVE foi positivamente correlacionado com a RT até o valor de 95 kPa e a TE até 87 kPa. Esses valores representam, portanto, a força máxima que as plântulas de milho enfrentaram sem comprometer o seu desenvolvimento. A partir desses valores houve um declínio pronunciado nos parâmetros de emergência conforme se aumentaram os valores de RT. A influência da RT em IVE e TE foram próximas, representando cerca de 59% no IVE e

62% na TE (Figura 34), embora a TE tenha demonstrado maior sensibilidade do que o IVE. O IVE foi forte e positivamente correlacionado com a friabilidade entre valores de 0,13 a 0,50. Isso indica que a friabilidade influenciou positivamente o IVE desde a classe de ligeiramente friável (0,1 a 0,2) até a classe de solo friável (0,2 a 0,5). A partir da classe muito friável (0,5 a 0,8) o IVE começou a declinar lentamente. A friabilidade representa a tendência que uma massa de solo tem de se desfazer em agregados de menores tamanhos sob aplicação de um estresse ou carga (WATTS; DEXTER, 1998), sendo, portanto de fundamental importância para a emergência das culturas. Todavia, elevados valores de friabilidade indicam que agregados maiores possuem menor resistência à ruptura do que agregados menores (TORMENA et al., 2008b). Isso explica o declínio dos parâmetros de emergência a partir da classe muito friável. A friabilidade explicou cerca de 72% da variabilidade no IVE. A TE não se correlacionou significativamente com a friabilidade. O valor de $\log K_{sat}$ de 1,40 pareceu ser o ótimo valor para o IVE neste solo (Figura 34). A maior resposta do IVE, no entanto ocorreu acima desse valor, indicando que um pequeno aumento em $\log K_{sat}$ resultou em grande redução do IVE. Já a TE apresentou $\log K_{sat}$ ótimo de 1,46 e um decréscimo menos abrupto com o aumento de $\log K_{sat}$. O IVE apresentou maior correlação com $\log K_{sat}$, tendo 86% da sua variabilidade explicada por esta propriedade, enquanto a TE obteve 68% da sua variabilidade atribuída a $\log K_{sat}$.

O parâmetro IVE apresentou mais correlações significativas com as propriedades do solo que a TE. Isso indica que para a cultura do milho este parâmetro mostra uma melhor resposta da cultura ao solo. Provavelmente o fato de o IVE computar no seu cálculo todas as medições diárias de emergência tenha favorecido esse resultado. Os atributos do solo IHO, K_a e o carbono orgânico tiveram a seleção dos *boundary* pontos, todavia não apresentaram um ajuste significativo de um modelo de regressão aos parâmetros de emergência do milho (IVE e TE).

Figura 33 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas da cama de semeadura do milho (2009)

Figura 34 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas da cama de semeadura do milho (2009)

2.3.4.2 Cama de semeadura da cultura da soja – 2010

As relações entre parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo para a cama de semeadura de soja foram todas ajustadas a um modelo de regressão polinomial quadrático (Figura 35). As correlações obtidas para a cama de semeadura de soja não foram semelhantes às obtidas na cama de semeadura do milho. Observa-se, por exemplo, que de forma contrária à primeira época a TE apresentou correlação significativa com a RP e θ medidos no campo. Já Ds que apresentou correlação significativa na cama de semeadura do milho não repetiu o mesmo para a de soja. Para Walworth et al. (1986) essas diferenças nas regressões entre anos se devem a outros fatores ou interação com outros fatores que se tornaram mais importantes em uma época que em outra. Outro fator está relacionado a propriedades que em um ano apresentaram uma negativa correlação e em outro uma positiva correlação, ou mesmo outro tipo de ajuste, como é o caso dos atributos RP e θ que apresentaram correlação linear na cama de semeadura de milho e polinomial quadrática na cama de semeadura de soja. Isso indica que as propriedades físicas avaliadas foram bastante dinâmicas ao longo do tempo promovendo resposta diferenciada das culturas de um ano para outro.

A RP medida no campo apresentou valores bastante elevados com relação à primeira época avaliada, no entanto, o IVE e a TE se correlacionaram positivamente com a RP até valores de 2,29 MPa. Embora fosse esperado um decréscimo abrupto a partir deste valor, o mesmo não ocorreu, indicando que mesmo com a predominância de valores de RP maiores que 2 MPa, tanto IVE quanto TE mantiveram adequados valores de emergência. Lima et al. (2010), no entanto, observaram que a altura de plantas de soja foi negativamente afetada pela RP a partir de valores de 1,9 MPa. Já Beutler et al. (2008) encontraram resultados mais semelhantes ao do presente estudo, onde a produtividade de soja apresentou uma relação polinomial com a RP, começando a decrescer a partir de valores de RP de 2,35 MPa. Mesmo com a RP explicando cerca de 60% da variabilidade em IVE e TE, os resultados demonstram que a RP não foi o principal fator limitando a emergência de soja. Bengough et al. (2005) relatam que a RP pode não ser o melhor indicador para impedimento do crescimento das plantas, especialmente em plantio direto onde a rede de canais contínuos para o crescimento radicular pode ser desenvolvida em uma matriz de solo relativamente densa, dessa forma as raízes são capazes de penetrar e explorar camadas compactadas. O conteúdo de água no solo medido no campo apresentou menores valores que o da primeira avaliação (milho 2009), isso pode ser reflexo da baixa precipitação pluviométrica ocorrida na cama de semeadura de soja em 2010 (Figura 2). A IVE e TE foram positivamente correlacionadas com o conteúdo de

água somente até $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, valores acima deste resultaram em drástica redução no IVE e na TE. O IVE e a TE tiveram cerca de 90% de sua variabilidade explicada pelo conteúdo de água no solo. Estes resultados indicam que o conteúdo de água foi mais limitante em relação ao IVE e TE que a RP.

Figura 35 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas da cama de semeadura da soja (2010)

O valor de EA de $34,24 \text{ ml min}^{-1}$ foi o valor ótimo para a TE neste solo, acima deste valor a TE apresentou um discreto decréscimo, indicando que o aumento em EA não teve um forte efeito sobre a emergência, mesmo com a EA explicando 90% da variação em TE (Figura 36). O valor ótimo de EA está dentro da faixa de rápida percolação, o que indica uma alta estabilidade de agregados. Uma linear e positiva correlação entre EA e produtividade de trigo

foi obtida por Mohanty et al. (2007), todavia com um baixo coeficiente de determinação (0,28). O IVE não apresentou correlação significativa com EA. De forma semelhante à primeira época o IVE apresentou uma maior resposta até o valor de RT igual a 96 kPa. A partir deste valor o IVE decresceu lentamente com o aumento em RT. A TE não se correlacionou significativamente com a RT. O IVE e a TE tiveram sua resposta maximizada até valores de friabilidade de 0,28. Isso mostra que de forma semelhante à primeira época, a friabilidade influenciou positivamente a IVE e TE até a classe de solo considerado friável. A forte correlação entre IVE e TE com a friabilidade indicou que esta foi responsável por 71% da variação em IVE e 85% em TE.

A TE foi positivamente correlacionada com $\log K_{sat}$ até o valor de $2,6 \text{ mm h}^{-1}$. Valor este bem superior ao encontrado para a primeira época (Figura 36). Vale ressaltar que a K_{sat} foi determinada em laboratório na primeira época e na segunda em campo. Com o aumento da $\log K_{sat}$ acima de $2,6 \text{ mm h}^{-1}$ houve um discreto decréscimo em TE, a qual teve 53% de sua variabilidade explicada pela K_{sat} . O IVE não apresentou correlação significativa com $\log K_{sat}$.

O valor ótimo de IHO para o IVE da soja foi $0,16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 36). Todavia a maior resposta da planta ocorreu acima deste valor, ocorrendo forte redução no IVE com o aumento no IHO. A base teórica do IHO sugere que quanto maior for o IHO mais favoráveis são as condições para o desenvolvimento da planta (SILVA et al., 2009). Entretanto, os resultados mostram que para a velocidade de emergência da cultura da soja existe um limite até onde o aumento do IHO beneficia o desenvolvimento da cultura. Como não existem resultados que mostraram a relação entre IHO e parâmetros de emergência da cultura da soja, Silva e Kay (1996) encontraram uma forte e positiva relação entre taxa de crescimento foliar de milho e IHO. Os resultados encontrados por eles corroboram o fato de que quanto maior o IHO maior o desenvolvimento da cultura, com o IHO representando 80% da variação do crescimento foliar de milho. Os *boundary* pontos selecionados entre TE e IHO não foram significativamente correlacionados.

Figura 36 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas da cama de semeadura da soja

As relações entre os parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo tanto para a cama de semeadura do milho quanto da soja indicam o IVE e a TE apresentaram altos valores mesmo em valores de propriedades físicas do solo acima dos limites críticos, especialmente para RP, F, RT e Ds. Isso indica que possivelmente os parâmetros de emergência foram mais dependentes das características da semente do que destas propriedades físicas do solo. Todavia, os resultados foram promissores para o uso da *boundary line* mostrando-se uma ferramenta complementar que pode ajudar na interpretação da resposta da emergência das culturas às propriedades físicas do solo.

2.3.4.3 Cama de semeadura da cultura do trigo – Experimento sistemas de preparo

As relações entre parâmetros de emergência e as propriedades físicas do solo foram todas ajustadas ao modelo polinomial quadrático (Figura 37). Para este experimento de sistemas de preparo houve correlação significativa para todas as relações testadas. A maior resposta do IVE à RP ocorreu acima de 2,2 MPa, havendo um forte declínio no IVE com pequenos aumentos na RP. Já a TE apresentou menor sensibilidade em relação à influência da RP, ocorrendo uma maior resposta da cultura até RP de 2,3 MPa, e a partir deste valor o aumento em RP resultou em baixa redução na TE. Mohanty et al. (2007), no entanto, observaram uma negativa e linear correlação entre produtividade de trigo e RP. O valor ótimo de conteúdo de água para o IVE foi $0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Houve uma maior resposta da planta até onde a relação foi positiva, porém havendo também um forte decréscimo do IVE em valores de θ superiores ao valor ótimo. A TE apresentou o valor ótimo de θ de $0,26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, havendo um acentuado declínio da TE em valores acima deste. Entretanto, uma relação linear foi obtida por Ferraris (1992) entre a TE e conteúdo de água no solo para as culturas do sorgo e girassol. O conteúdo de água pareceu influenciar mais o IVE do que a TE, representando cerca de 80% da variabilidade do primeiro e 59% da variabilidade do segundo.

O IVE e a TE apresentaram positiva correlação com valores de Ds, respectivamente, de 1,23 e 1,21 Mg m^{-3} (Figura 38). Acima destes valores houve forte declínio em IVE e TE com pequenos aumentos na Ds. O IVE teve 75% da sua variabilidade explicada pela Ds, enquanto a TE teve 90%.

Figura 37 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo

O modelo de regressão ajustado aos *boundary* pontos indicam que o IVE e a TE foram maximizadas até valores de IHO de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 38). A cultura apresentou uma baixa resposta para valores de IHO acima de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, havendo pequena redução em IVE e TE com o aumento do IHO. Poucos trabalhos têm correlacionado o IHO com os parâmetros de planta, sendo a produtividade da cultura o principal parâmetro correlacionado. Diferentemente dos nossos resultados, Benjamin et al. (2003), Verma e Sharma (2008) e Gathala et al. (2011) encontraram positiva e linear relação entre produtividade de trigo e IHO, com R^2 de, respectivamente, 0,76; 0,50 e 0,52. Esses autores observaram que quanto maior foi o IHO maior foi a produtividade de trigo. Entretanto, para a emergência de trigo essa relação se mostrou positiva somente até valores de IHO igual a $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

Figura 38 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo

2.3.4.4 Cama de semeadura da cultura do trigo – Experimento sistemas de cultivo

Para o experimento sistemas de cultivo dentre as oito possíveis relações entre parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo apenas metade apresentou correlação significativa. Dentre elas, a RP e θ medidos no campo apresentaram um ajuste de regressão linear aos *boundary* pontos, enquanto a Ds teve um ajuste polinomial quadrático (Figura 39). O IVE decresceu linearmente com o aumento da RP e aumentou linearmente com o aumento no conteúdo de água no solo. A RP indicou uma maior influência sobre o IVE do que o conteúdo de água no solo, enquanto a primeira explicou cerca 74% da variação no IVE, a segunda explicou apenas 57%. A TE se correlacionou significativamente com a RP e o

conteúdo de água no solo. Uma negativa relação entre IVE e TE com RP foram também obtidos por Nars e Selles (1995). Eles mostraram que 56% da variabilidade no IVE e 31% no TE da cultura do trigo foi explicada pela RP. Whalley et al. (2008) encontraram uma forte e negativa correlação entre RP e produtividade de trigo em um solo franco arenoso. Os resultados mostram que cerca de 72% da variabilidade na produtividade de trigo foi explicada pela RP. O IVE e a TE foi forte e positivamente correlacionados com a Ds até valores de 1,17 Mg m^{-3} . A maior resposta da cultura, no entanto ocorreu acima deste valor, havendo um pronunciado decréscimo em IVE e TE com pequenos aumentos na Ds. A relação do IVE e TE com a Ds foi semelhante, tendo o IVE 67% e a TE 64% de sua variabilidade explicada pela Ds. Os resultados corroboram os de Mohanty et al. (2007) que encontraram uma negativa relação entre Ds e produtividade de trigo em um Vertissolo da Índia. O IVE e a TE não apresentaram significativa correlação com o IHO.

Figura 39 – Gráficos de dispersão e regressões pelo procedimento *boundary line* entre parâmetros de emergência e propriedades físicas do solo

3 CONCLUSÕES

3.1 Experimento Escarificação mecânica e biológica – Brasil

A hipótese de que a escarificação mecânica e biológica resultaria em melhoria da qualidade física da cama de semeadura para emergência das culturas em solo cultivado sob plantio direto foi parcialmente comprovada. A emergência da cultura do milho foi positivamente afetada pelo cultivo do nabo forrageiro como ferramenta biológica de descompactação do solo. Porém, para a cama de semeadura de soja, este efeito não foi detectado. A resistência do solo à penetração medida no campo foi menor no PDNF nas duas épocas avaliadas quando comparado ao PD e PDE.

A estabilidade de agregados determinada pelo método da percolação de água demonstrou ser mais sensível do que a resistência tênsil de agregados em detectar mudanças na estrutura do solo promovidas pelos tratamentos. A escarificação mecânica promoveu redução da estabilidade de agregados do solo seis meses após sua aplicação e, 18 meses depois da escarificação, a estabilidade de agregados do solo foi recuperada. A escarificação biológica, por sua vez, promoveu melhoria da estabilidade de agregados somente 18 meses após o cultivo do nabo forrageiro. Devido ao efeito negativo sobre a estabilidade de agregados e a ausência de efeito sobre a resistência tênsil e friabilidade do solo, a escarificação mecânica não é, portanto, uma prática recomendada com vistas a melhorar a qualidade estrutural da cama de semeadura do solo. A resistência tênsil e a friabilidade da cama de semeadura do solo não foram afetadas pelas práticas da escarificação mecânica e biológica do solo.

A escarificação mecânica do solo foi eficiente em promover melhoria da condutividade hidráulica do solo saturado na camada 5-10 cm, somente até seis meses após sua aplicação. A escarificação biológica, por sua vez, não apresentou efeitos sobre a condutividade hidráulica do solo saturado nos dois períodos avaliados. A permeabilidade ao ar e o índice de continuidade de poros KI foram positivamente afetados pela escarificação biológica do solo no potencial -6 kPa na primeira época avaliada, e no potencial -30 kPa na segunda época na camada 0-5 cm. O cultivo do nabo forrageiro pode ser uma boa opção para melhorar a permeabilidade do solo ao ar e continuidade de poros em sistema plantio direto, principalmente em regiões de alta precipitação pluviométrica. O índice N e a porosidade bloqueada, no entanto, não se mostraram parâmetros sensíveis à escarificação mecânica e biológica do solo.

Os resultados demonstraram, pela redução da densidade do solo e aumento do intervalo hídrico ótimo do solo, que a escarificação mecânica apresentou um efeito benéfico

na qualidade física do solo aos seis meses após sua aplicação. Na avaliação feita aos 18 meses, não foi mais observado efeito da escarificação mecânica, indicando que esta prática é, para este solo, de caráter residual temporário, sendo efetiva somente até os seis após sua aplicação. A escarificação biológica, por sua vez, não mostrou eficácia em aumentar o intervalo hídrico ótimo do solo nem a curto e nem a médio prazo, apresentando de forma geral resultados semelhantes ao do sistema plantio direto testemunha. Todavia, os resultados não indicaram efeitos negativos da aplicação do nabo forrageiro como descompactador biológico no intervalo hídrico ótimo do solo. O intervalo hídrico ótimo mostrou-se um adequado indicador da qualidade física da cama de semeadura do solo em relação aos sistemas de manejo propostos.

Os resultados do procedimento *boundary line* indicaram que a emergência das culturas foi dependente das propriedades físicas da cama de semeadura do solo. No entanto, esta relação de dependência pode mudar de um ano para o outro, conforme verificado por algumas propriedades físicas que se correlacionaram com a emergência da cultura e no ano seguinte não. Além das propriedades físicas do solo, a emergência parece depender muito também das características da semente, visto que mesmo em condições limitantes de certas propriedades do solo, como a resistência à penetração, por exemplo, houve ainda altos valores de emergência. A utilização do procedimento *boundary line* mostrou-se uma ferramenta promissora e complementar para melhor entender a resposta de emergência das culturas em relação às propriedades físicas da cama de semeadura do solo.

Tomando por base o objetivo de melhorar a qualidade física da cama de semeadura do solo para emergência e crescimento das plantas, a avaliação geral das propriedades físicas do solo ao longo de duas safras agrícolas indica ser desnecessária a aplicação da escarificação mecânica devido ao seu baixo efeito residual. A cultura do nabo forrageiro como alternativa de escarificação biológica pode ser incluída no sistema de rotação de culturas, uma vez que se mostrou eficiente em melhorar algumas das propriedades físicas do solo promovendo incremento da qualidade estrutural da cama de semeadura do solo ou no mínimo apresentando condição física do solo semelhante ao do sistema plantio direto testemunha.

3.2 Experimentos Sistemas de Preparo e Sistemas de cultivo do solo – EUA

A hipótese de que os sistemas intensivos de cultivo e preparo conservacionista resultariam numa melhor condição física do solo foi parcialmente provada. Para o experimento sistemas de preparo, o preparo convencional, reduzido e plantio direto não

afetaram o IHO após 46 anos de manejo em um solo franco siltoso. O preparo reduzido foi geralmente associado com uma melhor cama de semeadura do solo para emergência de trigo. Dentre os sistemas de preparo, o convencional, de forma geral, mostrou ter a condição física do solo menos favorável à emergência do trigo. O preparo convencional apresentou menor densidade do solo na qual a resistência à penetração assumiu o limite inferior do IHO, e apresentou decréscimo mais acentuado do IHO com o aumento da densidade do solo em 0-5 cm. O IHO foi mais dependente da porosidade de aeração e resistência a penetração, sendo que a porosidade de aeração foi mais limitante em 5-10 cm do que em 0-5 cm.

O experimento sistemas de cultivo, por sua vez, afetaram o IHO. O maior IHO foi encontrado para os sistemas de cultivo sob preparo reduzido. O sistema de cultivo trigo/trigo sob preparo reduzido apresentou melhor qualidade física da cama de semeadura do solo. A relação negativa entre IHO e densidade do solo mostrou que os sistemas trigo/pousio e trigo/sorgo/pousio sob plantio direto podem ter efeitos adversos na disponibilidade de água do solo comparado com os mesmos sistemas de cultivo sob preparo reduzido. De forma geral, os sistemas de cultivo que incluíram a fase pousio foram menos favoráveis para emergência de trigo comparado ao trigo contínuo. Ambos os experimentos apresentaram um estreito IHO, o qual pode ser reflexo da reduzida disponibilidade de água nesta região semi-árida. O IHO foi um útil indicador da resposta do solo aos sistemas de preparo e cultivo.

Os parâmetros de emergência da cultura do trigo foram dependentes das propriedades físicas da cama de semeadura do solo pela análise *boundary line*, especialmente para o experimento sistemas de preparo onde houve correlação significativa entre a emergência e todas as propriedades físicas do solo avaliadas.

REFERÊNCIAS

- ABID, M.; LAL, R. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates moisture retention and water infiltration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 364-372, 2009.
- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco arenoso em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.
- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 275-282, 2003.
- AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E.; NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 699-702, 1984.
- AKINCI, I.; CAKIR, E.; TOPAKCI, M.; CANAKCI, M.; INAN, O. The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 77, p. 203–210, 2004.
- ALJIBURY, F.K.; EVANS, D.D. Water permeability of saturated soils as related to air permeability at different moisture tensions. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 366-369, 1965.
- ALVARO-FUENTES, J.; ARRUE, J.L.; GRACIA, R.; LOPEZ, M.V. Tillage and cropping intensification effects on soil aggregation: temporal dynamics and controlling factors under semiarid conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, p. 390-396, 2008.
- ANGERS, D.A.; CARON, J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks. **Biogeochemistry**, New York, v. 42, p. 55-72, 1998.
- ANKENY, M.D.; KASPAR, T.C.; HORTON, R. Characterization of tillage and traffic effects on unconfined infiltration measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 837-840, 1990.
- ARAUJO, 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 495-504, 2004.
- ARVIDSSON, J.; RYDBERG, T.; FEIZA, V. Early sowing – a system for reduced seedbed preparation in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 145-155, 2000.
- ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHU, M.R.; MAHBOUBI, A.A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A.R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 335, p. 229-244, 2010.

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

ATKINSON, B.S.; SPARKES, D.L.; MOONEY, S.J. Using selected soil physical properties of seedbeds to predict crop establishment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 97, p. 218-228, 2007.

_____. The impact of soil structure on the establishment of winter wheat (*Triticum aestivum*). **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 30, p. 243-257, 2009.

AUERSWALD, K. Percolation stability of aggregates from arable topsoil. **Soil Science**, Philadelphia, v. 159, p. 142-148, 1995.

AWADHWAL, N.K.; THIERSTEIN, G.E. Soil crust and its impact on crop establishment: a review. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 5, p. 289-302, 1985.

BALL, B.C. Modeling of soil pores as tubes using gas permeabilities, gas diffusivities and water release. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, p. 465-481, 1981a.

_____. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and air permeabilities and air-filled porosities. **Journal of Soil Science**, London, v. 32, p. 483-498, 1981b.

BALL, B.C.; SCHJØNNING, P. Air permeability. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. IV: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 1141-1158.

BALL, B.C.; O'SULLIVAN, M.F.; HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. **Journal of Soil Science**, London, v. 39, p. 327-339, 1988.

BARTOLI, F.; BURTIN, G.; GUÉRIF, J. Influence of organic matter on aggregation in Oxisols rich in gibbsite or in goethite. II. Clay dispersion, aggregate strength and water-stability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 54, p. 259-274, 1992.

BAVOSO, M.A.; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A.; PAULETTI, V. Preparo do solo em áreas de produção de grãos, silagem e pastejo: efeito na resistência tênsil e friabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 227-234, 2010.

BECHER, H.H.; KAINZ, M. Auswirkungen einer langjährigsten Stallmistdüngung auf das Bodengefüge im Loßgebiet bei Straubing. **Z Acker-Pflanzenb**, Berlin, v. 152, p. 152-158, 1983.

BENGOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; MCKENNA, S.J.; ROBERTS, T.; VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 57, p. 437-443, 2006.

BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 137-148, 2003.

BENJAMIN, J.G.; MIKHA, M.; NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F.; CALDERON, F.; HENRY, W.B. Cropping intensity effects on physical properties of a no-till silt loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 1160-1165, 2007.

BETZ, C.L.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M.; RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, p.1384-1393, 1998.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; FREDDI, O.S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1591-1600, 2008.

BHERING, S.B.; SANTOS, H.G; BOGNOLA, I.A.; CÚRCIO, G.R.; MANZATTO, C.V.; CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C.S.; ÁGLIO, M.L.D.; SOUZA, J.S. **Mapa de solos do Estado do Paraná**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: EMBRAPA; IAPAR, 2008. 74 p.

BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C.; MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **European Journal of Soil Science**, Cranfield, v. 41, p. 215-228, 1990.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C.A.; GUIMARÃES, R.M.L.; NANNI, M.R. Qualidade física de um latossolo sob plantio direto influenciada pela cobertura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 79-87, 2012.

BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num nitossolo vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 273-281, 2009.

BLAKE, J.J.; SPINK, J.H.; DYER, C. **Factors affecting cereal establishment and its prediction**. London: Home-Grown Cereals Authority, 2003. 53 p. (Research Review, 51).

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. Regional assessment of soil compaction and structural properties under no-tillage farming. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 1770-1778, 2007.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; STAHLMAN, P.W. Soil response to long-term cropping systems on an Argiustoll in the central Great Plains. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 74, p. 602-611, 2010.

BLANCO-CANQUI, H.; GANTZER, C.J.; ANDERSON, S.H.; ALBERTS, E.E. Tillage and crop influences on soil properties for an Epiaqualf. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 567-576, 2004.

BLANCO-CANQUI, H.; MIKHA, M.M.; PRESLEY, D.R.; CLAASSEN, M.M. Addition of cover crops enhances no-till potential for improving soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 1471-1482, 2011.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M.; IZAURRALDE, R.C. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the Northern Appalachians. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1472-1481, 2005.

BLANCO-CANQUI, H.; STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J.; BENJAMIN, J.G.; VIGIL, M.F.; STAHLMAN, P.W. Continuous cropping systems reduce near-surface maximum compaction in no-till soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, p. 1217-1225, 2010.

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

BLANCO-CANQUI, H.; MIKHA, M.M.; BENJAMIN, J.G.; STONE, L.R.; SCHLEGEL, A.J.; LYON, D.J.; VIGIL, M.F.; STAHLMAN, P.W. Regional study of no-till impacts on near-surface aggregate properties that influence soil erodibility. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 1361-1368, 2009.

BLANCO-MACÍAS, F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R.D.; VÁZQUEZ-ALVARADO, R.; OLIVARES-SÁENZ, E.; GUTIÉRREZ-ORNELAS, E.; VIDALES-CONTRERAS, J.A.; MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 173, p. 927-934, 2010.

BORDOVSKY, D.G.; CHOUDHARY, M.; GERARD, C. Tillage effects on grain sorghum and wheat yields in the Texas Rolling Plains. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, p. 638-643, 1998.

BOSCH, D.D.; WEST, L.T. Hydraulic conductivity variability for two sandy soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 90-98, 1998.

BOTTA, G.F.; BECERRA, A.T.; MELCON, F.B. Seedbed compaction produced by traffic on four tillage regimes in the rolling Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 128-134, 2009.

BRAUNACK, W.A.; DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of aggregate sizes on plant growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 14, p. 281-298, 1989.

BROWN, A.D.; DEXTER, A.R.; CHAMEN, W.C.T.; SPOOR, G. Effect of soil macroporosity and aggregate size on seed-soil contact. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p. 203-216, 1996.

BULMER, C.E.; SIMPSON, D.G. Soil compaction and water content as factors affecting the growth of lodgepole pine seedlings on sandy clay loam soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 85, p. 667-679, 2005.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; FREDERICK, J.R. Recompaction of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 49-57, 2002.

BUSSCHER, W.J.; EDWARDS, J.H.; VEPRASKAS, M.J.; KARLEN, D.L. Residual effects of slit tillage and subsoiling in a hardpan soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 115-123, 1995.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotação de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1399-1407, 2008.

_____. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 33, p. 242-249, 2010.

_____. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 759-771, 2011.

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**, Viçosa, v. 29, p. 789-796, 2005a.

_____. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 813-819, 2005b.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade dos agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 14, p. 99-105, 1990.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 70, p. 425-433, 1990.

CASANOVA, D.; EPERNA, G.F.; BOURNA, J.; GOUDRIAAN, J. Yield-gap analysis in relation to soil properties in direct seeded flooded rice. **Geoderma**, Amsterdam, v. 91, p. 191-216, 1999.

CASANOVA, D.; GOUDRIAAN, J.; FORNER, M.M.C.; WITHAGEN, J.C.M. Rice yield prediction from yield components and limiting factors. **European Journal of Agronomy**, Montpellier, v. 17, p. 41-61, 2002.

CASSEL, D.K.; BOWEN, H.D.; NELSON, L.A. An evaluation of mechanical impedance for three tillage treatments on Norfolk Sandy Loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, p. 116-120, 1978.

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

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CHEN, G.; WEIL, R.R. Penetration of cover crops roots through compacted soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 331, p. 31-43, 2010.

CHEN, Y.; CAVERS, C.; TESSIER, S.; MONERO, F.; LOBB, D. Short-term tillage effects on soil cone index and plant development in a poorly drained, heavy clay soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 161-171, 2005.

CLARK, L.J.; WHALLEY, W.R.; BARRACLOUGH, P.B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255, p. 93-104, 2003.

COMIA, R.A.; STENBERG, M.; NELSON, P.; RYDBERG, T.; HAKANSSON, I. Soil and crop responses to different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 29, p. 335-355, 1994.

CRESSWELL, H.P.; KIRKEGAARD, J.A. Subsoil amelioration by plant root – the process and the evidence. **Australian Journal of Soil Research**, Acton, v. 33, p. 221-239, 1995.

CZYZ, E.A. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 153-166, 2004.

DAM, R.F.; MEHDI, B.B.; BURGESS, M.S.E.; MADRAMOOTOO, C.A.; MEHUY, G.R.; CALLUMA, I.R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 41-53, 2005.

DANE, J.H.; HOPMANS, J.H. Water retention and storage. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. IV: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 671-717.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.

_____. Amelioration of soil by natural processes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 87-100, 1991.

DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B. Methodology for determination of tensile strength of soil aggregates. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 31, p. 139-147, 1985.

DEXTER, A.R.; WATTS, C. Tensile strength and friability. In: SMITH, K; MULLINS, C. (Ed.). **Soil and environmental analysis, physical methods**. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2000. p. 401-430.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 185-189, 2004.

DIAZ-ZORITA, M. Effect of deep tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 11-19, 2000.

DORNER, J.; HORN, R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 225-232, 2009.

DOUGLAS, J.T.; JARVIS, M.G.; HOWSE, K.R.; GOSS, M.J. Structure of a silty soil in relation to management. **Journal of Soil Science**, London, v. 37, p. 137-151, 1986.

DRURY, C.F.; ZHANG, T.Q.; KAY, B.D. The non-limiting and least limiting water ranges for soil nitrogen mineralization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1388-1404, 2003.

DRURY, C.F.; TAN, C.S.; WELACKY, T.W.; OLOYA, T.O.; HAMILL, A.S.; WEAVER, S.E. Red clover and tillage influence soil temperature, moisture, and corn emergence. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p. 101-108, 1999.

EAVIS, B.W. Soil physical conditions affecting seedling root growth: I. Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by bulk density and moisture level in a sandy loam soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.36, p.613-622, 1972.

ELLIOT, J.A.; DE JONG, E. Prediction of field denitrification rates: a boundary-line approach. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 82-87, 1993.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

EVANS, S.D.; LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B.; MONCRIEF, J.F.; NELSON, G.A. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p. 35-46, 1996.

FABRIZZI, K.P.; GARCIA, F.O.; COSTA, J.L.; PICONE, L.I. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 81, p. 57-69, 2005.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 20 maio 2012.

FERRARIS, R. Seedbed factors affecting establishment of summer crops in a Vertisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 23, p. 1-25, 1995.

FERRERAS, L.A.; BATTISTA, J.J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 161-170, 2001.

FERRERAS, L.A.; COSTA, J.L.; GARCIA, F.O.; PECORARI, C. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern Pampa of Argentina. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, p. 31-39, 2000.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Least limiting water range and physical quality of soil under groundcover management systems in citrus. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 448-453, 2010.

FIENER, P.; AUERSWALD, K. Rotation effects of potato, maize, and winter wheat on soil erosion by water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 1919-1925, 2006.

FIGUEIREDO, G.C. **Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo**. 2010. 163 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2010.

FINLAY, M.J.; TISDALL, J.M.; MCKENZIE, B.M. Effect of tillage below the seed on emergence of wheat seedlings in a hardsetting soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 28, p. 213-225, 1994.

FISH, A.N.; KOPPI, A.J. The use of a simple field air permeameter as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, p. 255-264, 1994.

GARTZIA-BENGOETXEA, N.; GONZALEZ-ARIAS, A.; KANDELER, E.; MARTINEZ DE ARANO, E. Potential indicators of soil quality in temperate forest ecosystems: a case study in Basque Country. **Annals of Forest Science**, Dordrecht, v. 66, p. 303-315, 2009.

GATHALA, M.K.; LADHA, J.K.; SAHARAWAT, Y.S.; KUMAR, V.; KUMAR, V.; SHARMA, P.K. Effect of tillage and crop establishment methods on physical properties of a medium-textured soil under a seven-year rice-wheat rotation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 75, p. 1851-1862, 2011.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186, 1968.

GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, p. 101-114, 1984.

GROHMANN, F.; CONAGIN, A. Técnica para estudo da estabilidade de agregados do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 19, p. 329-343, 1960.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. IV: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 201-225.

GUIMARÃES, R.M.L.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop livestock system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 499-505, 2009.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 105-120, 1990.

HÅKANSSON, I.; MYRBECK, A.; ETANA, A. A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 23-40, 2002.

HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 239-282, 1988.

HAMILTON-MANNS, M.; ROSS, C.W.; HORNE, D.J.; BAKER, C.J. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 68, p. 109-119, 2002.

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

HEARD, J.R.; KLADIVKO, E.J.; MANNERING, J.V. Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 1-18, 1988.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1656-1661, 2002.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 106, p. 303-310, 2010.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000, versão 1.0. Londrina, 2000. 1 CD ROM.

IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; JACOBSEN, O.H. Field application of a portable air permeameter to characterize spatial variability in air and water permeability. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 2, p. 618-626, 2003.

IVERSEN, B.V.; MOLDRUP, P.; SCHJØNNING, P.; LOLL, P. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 643-659, 2001.

JAKOBSEN, B.F.; DEXTER, A.R. Effect of soil structure on wheat root growth, water uptake and grain yield. A computer simulation model. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 10, p. 331-345, 1987.

KADZIENE, G.; MUNKHOLM, L.J.; MUTEGLI, J.K. Root growth conditions in the topsoil as affected by tillage intensity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 166, p. 66-73, 2011.

KAUFMANN, M.; TOBIAS, S.; SHULIN, R. Comparison of critical limits for crop plant growth based on different indicators for the state of soil compaction. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Oldenburg, v. 173, p. 573-583, 2010.

KAY, B.D.; DEXTER, A.R. The influence of dispersible clay and wetting/drying cycles on the tensile strength of a Red-Brown Earth. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, p. 297-310, 1992.

KAY, B.D.; SILVA, A.P.; BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 77, p. 655-667, 1997.

KAY, B.D.; DEXTER, A.R.; RASIAH, V.; GRANT, C.D. Weather, cropping practices and sampling depth effects on tensile strength and aggregate stability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.32, p.135-148, 1994.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. I: Physical and mineralogical methods. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 425-442.

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

KUBOTA, A.; HOSHIBA, K.; BORDON, J. Green-manure turnip for soybean based no-tillage farming systems in eastern Paraguay. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 150-158, 2005.

LAL, R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science**, Baltimore, v. 135, p. 191-207, 2000.

LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTÍNEZ, C. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 526-536, 2003.

LANZANOVA, M.E.; ELTZ, F.L.; NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; REINERT, D.J.; ROCHA, M.R. Atributos físicos de um Argissolo em sistemas de culturas de longa duração sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1333-1342, 2010.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G.; CURNOW, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 151-170, 2004.

LARNEY, F.J.; LINDWALL, C.W. Rotation and tillage effects on available soil water for winter wheat in a semi-arid environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 111-127, 1995.

- LARNEY, F.J.; FORTUNE, R.A.; COLLINS, J.F. Intrinsic soil physical parameters influencing intensity of cultivation procedures for sugar beet seedbed preparation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 12, p. 253-267, 1988.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; PERFECT, E.; TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1210-1215, 2005.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, p. 279-285, 2006.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.
- LEWANDOWSKI, I.; SCHMIDT, U. Nitrogen, energy and land use efficiencies of miscanthus, reed canary grass and triticale as determined by the boundary line approach. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 112, p. 335-346, 2006.
- LICHT, M.A.; AL-KAISI, M. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 80, p. 233-249, 2005.
- LIMA, C.L.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 89-98, 2010.
- LINN, D. M.; DORAN, J.W. Effect of water filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 1267-1272, 1984.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 107-136, 2003.
- LIPIEC, J.; KUS, J.; NOSALEWICZ, A.; TURSKI, M. Tillage system effects on stability and sorptivity of soil aggregates. **International Agrophysics**, Lublin, v. 20, p. 189-193. 2006.
- LOGSDON, S.D.; KARLEN, D.L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 143-149, 2004.
- LOGSDON, S.D.; MCCOY, E.L.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R. Macropores characterization by indirect methods. **Journal of Soil Science**, London, v. 155, p. 316-324, 1993.
- LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P.; RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, p. 2387-2400, 1999.
- MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, p. 176-177, 1962.

MAHL, D.; SILVA, R.B.; GAMERO, C.A.; SILVA, P.R.A. Resistência do solo à penetração, cobertura vegetal e produtividade do milho em plantio direto escarificado. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 30, p. 741-747, 2008.

MASLE, J., PASSIOURA, J.B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 14, p. 643-656, 1987.

MBAGWU, J.S.C.; AUERSWALD, K. Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, p. 197-206, 1999.

MCCALLUM, M.H.; KIRKEGAARD, J.A.; GREEN, T.W.; CRESSWELL, H.P.; DAVIES, S.L.; ANGUS, J.F.; PEOPLES, M.B. Improved subsoil macroporosity following perennial pastures. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 44, p. 299-307, 2004.

MCCARTHY, K.P.; BROWN, K.W. Soil gas permeability as influenced by soil gas-filled porosity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 997-1003, 1992.

MCQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 217-230, 2002.

MCVAY, K.A.; BUDDE, J.A.; FABRIZZI, K.; MIKHA, M.M.; RICE, C.W.; SCHLEGEL, A.J.; PETERSON, D.E.; SWEENEY, D.W.; THOMPSON, C. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 434-438, 2006.

MEDEIROS, J.C.; SILVA, A.P.; CERRI, C.E.P.; GIAROLA, N.F.B.; FIGUEIREDO, G.C.; FRACETTO, F.J.C. Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 338, p. 5-15, 2011.

MEEK, B.D.; DETAR, W.R.; ROLPH, D.; RECHEL, E.R.; CARTER, L.M. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 505-508, 1990.

MIRETTI, M.C.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; LAVADO, R. Soil structure degradation in patches of alfalfa fields. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 604-610, 2010.

MODOLO, A.J.; FERNANDES, H.C.; SCHAEFER, C.E.G.; SILVEIRA, J.C. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 1259-1265, 2008.

MOHANTY, M.; PAINULI, D.K.; MISRA, A.K.; GHOSH, P.K. Soil quality effects of tillage and residue under rice-wheat cropping on a Vertisol in India. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 243-250, 2007.

MONROE, C.D.; KLADIVKO, E.J. Aggregate stability of a silt loam as affected by roots of maize, soybean and wheat. **Communications in Soil Science and Plants Analysis**, New York, v. 8, p. 1077–1087, 1987.

NASR, H.M.; SELLES, F. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 34, p. 61–76, 1995.

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*, Viçosa, v. 32, p. 1723-1734, 2008.

OLIBONE, D.; ENCIDE-OLIBONE, A.P.; ROSOLEM, C.A. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 6, p. 485-493, 2010.

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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 201–210, 2011.

PASSIOURA, J.B. Soil conditions and plant growth. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 25, p. 311-318, 2002.

PERDOK, U.D.; KOUWENHOVEN, J.K. Soil-tool interactions and field performance of implements. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 283-326, 1994.

PETERSON, G.A.; WESTFALL, D.G. Managing precipitation use in sustainable dryland agroecosystems. **Annals of Applied Biology**, Warwick, v. 144, p. 127–138, 2004.

PHENE, C.J.; BEALE, W. High-frequency irrigation for water nutrient management in humid regions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 430-436, 1976.

PIERCE, F.J.; FORTIN, M.C.; STATON, M.J. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no tillage on soil physical properties and corn performance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 149-165, 1992.

_____. Periodic plowing effects on soil properties in a no-till farming system. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1782-1787, 1994.

PIKUL, J.L.; CHILON, G.; RICE, J.; EYNARD, A.; SHUMACHER, T.; NICHOLS, K.; JOHNSON, J.M.F.; WRIGHT, S.; CAESAR, T.; ELLSBURY, M. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 73, p. 197-206, 2009.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; THORBJØRN, A.; SCHJØNNING, P. Predicting air permeability in undisturbed, subsurface sandy soils from air-filled porosity. **Journal of Environmental Engineering**, New York, v. 133, p. 995-1001, 2007.

POULSEN, T.G.; MOLDRUP, P.; WENDROTH, O.; NIELSEN, D.R. Estimating saturated hydraulic conductivity and air permeability from soil physical properties using statespace analysis. **Soil Science**, Baltimore, v. 168, p. 311-320, 2003.

PRADO, R.M.; TORRES, J.L.; ROQUE, C.G.; COAN, O. Semente de milho sob compressão do solo e profundidade de semeadura: influência no índice de velocidade de emergência. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 2, p. 45-49, 2001.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; ALMEIDA, M.V.P. Avaliação de um solo argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo à Penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Resumo expandido...** Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001. 1 CDROM.

REHFELDT, K.R.; BOGGS, J.M.; GELHAR, L.W. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer 3: Geostatistics analysis of hydraulic conductivity. **Water Resource Research**, Washington, v. 28, p. 3309-3324, 1992.

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

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

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

REIS, E.F.; SHAEFR, C.E.G.R.; FERNANDES, H.C.; NAIME, J.M.; ARAUJO, E.F. Densidade do solo no ambiente solo-semente e velocidade de emergência em sistema de semeadura de milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 777-786, 2006.

REYNOLDS, W.D.; ELRICK, D.E. Falling head soil core (Tank) method. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. IV: Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 809-812.

RILEY, H.; POMMERECHE, R.; ELTUN, R.; HANSEN, S.; KORSAETH, A. Soil structure, organic matter and earthworm activity in a comparison of cropping systems with contrasting tillage, rotations, fertilizer levels and manure use. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, Amsterdam, v. 124, p. 275–284, 2008.

RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; ROSA, J. A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 105-114, 2011.

ROSEBERG, R.J.; McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 969-974, 1990.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, p. 109-115, 2002.

ROSS, P.J.; WILLIAMS, J.; BRISTOW, K.L. Equations for extending water retention curves to dryness. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 923-992, 1991.

RYDBERG, T. **Studies in ploughless tillage in Sweden 1975-1986**. Uppsala: Division of Soil Management, 1987. 35 p. (Relatório Técnico, 76).

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**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.

SAS INSTITUTE. **SAS: user's guide: statistics**. 9th ed. Cary, 2002. 943 p.

SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; ELMHOLT, S.; OLESEN, J.E. Organic matter and soil tilth in arable farming: Management makes a difference within 5–6 years. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 122, p. 157–172, 2007.

SCHJØNNING, P.; MUNKHOLM, L.J.; MOLDRUP, P.; JACOBSEN, O.H. Modeling soil pore characteristics from measurements of air exchange: the long term effects of fertilization and crop rotation. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, p. 331-339, 2002.

SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I.K.; MØBERG, J.P.; JONGE, H.; KRISTENSEN, K.; CHRISTENSEN, B.T. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, p. 177-198, 1999.

SCHMID, T.U.; THONI, H.; KAUPENJOHANN, M. Using a boundary line approach to analyze N₂O flux data from agricultural soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 57, p. 119–129, 2000.

SECCO, D.; REINERT, D.J. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo Vermelho-escuro sob plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, 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**, Santa Maria, v. 39, p. 58-64, 2009.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. Analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, Cambridge, v. 52, p. 591-611, 1965.

SHARMA, K. L.; MANDAL, U. K.; SRINIVAS, K.; VITTAL, K. P. R.; MANDAL, B.; GRACE, J. K.; RAMESH, V. Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.83, p. 246-259, 2005.

SHARMA, P.K.; BHUSHAN, L. Physical characterization of a soil amended with organic residues in a rice-wheat cropping system using a single value soil physical index. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.60, p.143-152, 2001.

SHAVER, T.M.; PETERSON, G.A.; AHUJA, L.R.; WESTFALL, D.G.; SHERROD, L.A.; DUNN, G. Surface soil physical properties after 12 years of dryland no-till management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1296-1303, 2002.

SHAVER, T.M.; PETERSON, G.A.; SHERROD, L.A. Cropping intensification in dryland systems improves soil physical properties: Regression relations. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, p.149-164, 2003.

SHIPITALO, M.J.; PROTZ, R. Comparison of morphology and porosity of a soil under conventional and zero tillage. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.67, p.445-456, 1987.

SHTYKOV, V.I.; DAISHEV, S.T. Determination of air permeability of soils. **Soviet Soil Science**, New York, v.18, p.115-122, 1986.

SHUKLA, M.K.; LAL, R.; EBINGER, M.H. Physical and chemical properties of a minespoil eight years after reclamation in Northeastern Ohio. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69, p.1288-1297, 2005.

SIEGEL-ISSEM, C.M.; BURGER, J.A.; POWERS, R.F.; PONDER, F.; PATTERSON, S.C. Seedling root growth as a function of soil density and water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69, p.215-226, 2005.

SIEGRIST, S.; SCHAUB, D.; PFIFFNER, L.; MADER, P. Does organic agriculture reduce soil erodibility? The results of a long-term study on loess in Switzerland. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, Amsterdam, v.69, p.253-264, 1998.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 184, p. 323-329, 1996.

_____. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 884-888, 1997.

_____. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 167-174, 2004.

SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; KAY, B.D. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 451-456, 2004.

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

SILVA, A.P.; LEAO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determination of air permeability in undisturbed soil samples by the decreasing pressure method. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, G.L.; LIMA, H.V.; CAMPANHA, M.M.; GILKES, R.J.; OLIVEIRA, T.S.; Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, Amsterdam, v. 167/168, p. 61-70, 2011.

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**, Viçosa, v. 36, p. 547-555, 2012.

SILVEIRA JUNIOR, S.D. **Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à escarificação mecânica e biológica**. 2012. 64p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

SINGH, B.; MALHI, S.S. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, p. 143-153, 2006.

SKIDMORE, E.L.; POWERS, D.H. Dry soil aggregate –stability: energy based index. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 1274-1279, 1982.

SNYDER, V.A.; VÁZQUEZ, M.A.; MARTÍNEZ, G.; RAMÍREZ, L.; HADAS, A. Controlled displacement technique for measuring soil friability. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p. 44-52, 1995.

SO, H.B.; GRABSKI, A.; DESBOROUGH, P. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, p. 180-184, 2009.

SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J.; GOODEN, D.T.; MORRISON, W.H. Subsoiling for sunflower production in the Southeast Coastal Plains. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 1107-1112, 1990.

SPRINGER, D.S.; LOAICIGA, H.A.; CULLEN, S.J.; EVERETT, L.G. Air permeability of porous materials under controlled laboratory conditions. **Ground Water**, Dublin, v. 36, p. 558-565, 1998.

STIRZAKER R.J.; WHITE I. Amelioration of soil compaction by a cover-crop for no-tillage lettuce production. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 46, p. 553-568, 1996.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 83-91, 1999.

- SUWARDJI, P.; EBERBACH, P.L. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandosol) after 16 years of direct drilling on conventional cultivation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 65–77, 1998.
- TANNER, C.B.; WENGEL, R.W. An air permeameter for field and laboratory use. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 21, p. 663-664, 1957.
- TAPELA, M.; COLVIN, T.S. Quantifying seedbed condition using soil physical properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 64, p. 203–210, 2002.
- TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I.C.B.; RIBON, A.A.; BARBOSA, G.M.C. Efeito da escarificação na condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 996-999, 2006.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.R. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.
- THOMPSON, C.A. Winter wheat and grain sorghum production as influenced by depth of soil water, tillage and cropping system. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 56, p. 56-63, 2001.
- THOMPSON, C.A.; WHITNEY, D.A. Effects of 30 years of cropping and tillage systems on surface soil test changes. **Communications in Soil Science and Plants Analysis**, New York, v. 31, p. 241-257, 2000.
- TORMENA, C.A.; DA SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.
- _____. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223-232, 1999.
- TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 33-42, 2008a.
- 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.795-801, 2002.
- TORMENA, C.A.; ARAUJO, M.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S.; SILVA, A.P. Quantificação da resistência tênsil e da friabilidade de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 943-952, 2008b.

TULI, A.; HOPMANS, J.W.; ROLSTON, D.E. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1361-1371, 2005.

TWOMLOW, S.J.; PARKINSON, R.J.; REID, I. Temporal changes in soil physical conditions after deep loosening of a silty clay loam in SW England. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 31-47, 1994.

UNGER, P.W.; JONES, T.E. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 45, p. 39-57, 1998.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

UNGER, P.W.; VIGIL, M.F. Cover crops effects on soil water relationships. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 53, p. 200-207, 1998.

UTOMO, W.H.; DEXTER, A.R. Soil friability. **The Journal of Soil Science**, Oxford, v. 32, p. 203-213, 1981.

VAKALI, C.; ZALLER, J. G.; KOPKE, U. Reduced tillage effects on soil properties and growth of cereals and associated weeds under organic farming. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, p. 133-141, 2011.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 767-777, 2009.

VERMA, S.; SHARMA, P.K. Long term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 98, p. 1-10, 2008.

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**, Viçosa, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

VIZCAÍNO-SOTO, G.; CÔTÉ, B. Boundary-line approach to determine standards of nutrition for mature trees from spatial variation of growth and foliar nutrient concentrations in natural environments. **Communications in Soil Science and Plants Analysis**, New York, v. 35, p. 2965-2985, 2004.

VYN, T.J.; RAIMBAULT, B.A. Long term effect of five tillage systems on corn response and soil structure. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, p. 1074-1079, 1993.

WALWORTH, J.L.; LETZSCH, W.S.; SUMNER, M.E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 123-128, 1986.

WARRICK A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 49, p. 73-84, 1998.

WEAICH, K.; CASS, A.; BRISTOW, K.L. Use of a penetration resistance characteristic to predict soil strength development during drying. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 149-166, 1992.

WEBB, R.A. Use of the boundary line in the analysis of biological data. **Journal of Horticulture Science**, London, v. 47, p. 309-319, 1972.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, p. 487-494, 2005.

WHALLEY, W.R.; WATTS, C.W.; GREGORY, A.S.; MOONEY, S.J.; CLARK, L.J.; WHITMORE, A.P. The effect of soil strength on the yield of wheat. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 306, p. 237-247, 2008.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 1403-1409, 2004.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 891-900, 2004.

WU, L.; SWAN, J.B.; PAULSON, W.H.; RANDALL, G.W. Tillage effects on measured soil hydraulic properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 25, p. 17-33, 1992.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUNSON, F.; MITCHELL, J.; McCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Non limiting water range (NLWR) as index of soil quality as related to physical properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 401-414, 2003.

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

YOO, G.; WANDER, M.M. Influence of tillage practices on soil structural controls over carbon mineralization. **Soil Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 651-659, 2006.

YOO, G.; NISSEN, T.M.; WANDER, M.M. Use of physical properties to predict the effects of tillage practices on organic matter dynamics in three Illinois soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, p. 1576-1583, 2006.

ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G.; HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 38, p. 947-958, 2000.