



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS PATO BRANCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



SONIA TOIGO

**REMEDIAÇÃO MECÂNICA E BIOLÓGICA DA COMPACTAÇÃO
INICIAL DE UM NITOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM TRIGO**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO

2010

SONIA TOIGO

**REMEDIAÇÃO MECÂNICA E BIOLÓGICA DA COMPACTAÇÃO
INICIAL DE UM NITOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM TRIGO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Pato Branco*, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Dr. João Alfredo Braidá
Co-Orientador: Dr. Jean Carlo Possenti

PATO BRANCO

2010

T646r Toigo, Sonia

Remediação mecânica e biológica da compactação inicial de um nitossolo vermelho cultivado com trigo / Sonia Toigo. Pato Branco. UTFPR, 2010
80 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. João Alfredo Braidá

Co-Orientador: Prof. Dr. Jean Carlo Possenti

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Pato Branco/PR, 2010.

Bibliografia: f. 63 – 75

1. Plantio direto. 2. Escarificação do solo. 3. *Cajanus cajan*. 4. *Raphanus sativus*.
5. Física do solo I. Braidá, João Alfredo. II. Possenti, Jean Carlo. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. V. Título.

CDD 630



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Pato Branco
Gerência de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Agronomia



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação nº 028


Remediação biológica e mecânica da compactação inicial de um Nitossolo Vermelho cultivado com trigo

por


Sonia Toigo

Dissertação apresentada quatorze horas do dia vinte e cinco de junho de dois mil e dez, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM AGRONOMIA, Linha de Pesquisa – Integração Lavoura-Pecuária, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco. A candidata foi argüida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho. . . APROVADA

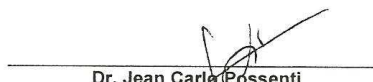
Banca examinadora:



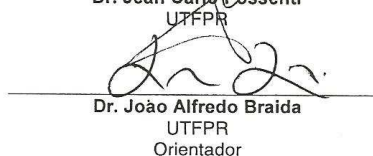
Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva
UFSM



Dr. Michelangelo Mujzeli Trezzi
UTFPR



Dr. Jean Carla Possenti
UTFPR



Dr. João Alfredo Braida
UTFPR
Orientador

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Idemir Citadin
Coordenador do PPGA

*A quem é mestre por vocação, minha mãe, Teresinha Minusculi Toigo,
e a meu pai, Ari Toigo, que em sua tímida escolaridade é dono de uma
sabedoria inestimável, Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ari e Tere, por estarem sempre dispostos a ajudar, não medindo esforços nos momentos em que mais precisei, primando sempre pela educação e formação de seus filhos e principalmente pelo incentivo que nunca faltou.

Aos meus irmãos Sandra Mara e Renato Toigo, presença incondicional de amor, carinho, apoio e muita alegria em minha vida.

Aos meus sobrinhos, Alexsander e Bianca, que em seus inocentes gestos de carinho são incapazes de estimar a grandeza dos estímulos que nos despertam.

A João Alfredo Braida, manifesto um já saudoso agradecimento pelos ensinamentos, mas sobretudo, pela oportunidade de realização de um trabalho sob sua orientação o qual possibilitou conhecer um pouco mais alguém a quem admiro, não somente pelo notável conhecimento científico, mas especialmente, pelas qualidades essencialmente humanas que possui e as deixa externar no convívio.

A Jean Carlo Possenti, que aceitou a tarefa de co orientar este trabalho, abraçando-o com extrema dedicação e entusiasmo, as palavras são simples e talvez insuficientes para agradecer.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná através dos professores e funcionários, que ao receber ensinamentos e compartilharmos tarefas estabelecemos verdadeiros elos de amizade, tornando possível uma vez mais a conquista de novos conhecimentos, aperfeiçoamento profissional e pessoal.

Ao meu namorado Carlos Eduardo, por ouvir pacientemente os desabafos, colaborar na execução dos mais variados trabalhos, com muita alegria encorajar-me ou apenas por estar meu lado, pois é essa nossa escolha pelo resto da vida.

Aos meus colegas e amigos pra toda vida, Vanessa Tomazeli e Henrique Luis, pelo auxílio nos trabalhos que realizamos juntos.

De coração agradeço!

“O que acontecer a terra, acontecerá a seus filhos”.

É a sentença dada pela natureza, que mostra ao homem tão forte a sua grande fraqueza, por não saber conviver, desmancha para fazer, da morte surgir riqueza.

Mexer com a terra é ter paciência pela espera. É arrancar de baixo do pedregulho o orgulho de ser cultivador. É de certa forma ser senhor do próprio nascimento. É ter uma infinidade de segredos neste longo e belo relacionamento.

Não basta inventar mil artifícios se estes inventos se transformam em vícios e modificam nossa identidade. É preciso evitar o constrangimento e saber que o principal insumo para se produzir o alimento, é sem dúvida nenhuma o valor da honestidade.

(ADEMAR BOGO)

RESUMO

TOIGO, Sonia. Remediação mecânica e biológica da compactação inicial de um Nitossolo Vermelho cultivado com trigo. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção Vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2010.

A compactação do solo é comumente observada em lavouras em que foi adotado o sistema de plantio direto. Sua origem está relacionada ao acúmulo do efeito das pressões produzidas pelo trânsito de máquinas agrícolas e/ou de animais. A compactação do solo impõe restrições ao desenvolvimento das culturas e compromete seu potencial produtivo, basicamente por reduzir a disponibilidade de água às plantas, por dificultar as trocas gasosas e o suprimento de oxigênio às raízes e por reduzir o volume de solo explorado pelas raízes em função da elevada impedância mecânica. Este trabalho foi realizado na área experimental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus Dois Vizinhos*. Os objetivos do estudo foram avaliar as alterações nas propriedades físicas do solo e os efeitos sobre a produtividade da cultura do trigo em um Nitossolo Vermelho distroférico submetido a três níveis iniciais de compactação. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com três repetições com parcelas subdivididas. Os níveis de compactação do solo utilizados foram distribuídos nas parcelas principais sendo caracterizados como: plantio direto contínuo (PDC); plantio direto escarificado (PDE); plantio direto com compactação adicional (PDA). Nas subparcelas aplicaram-se quatro sistemas de manejo: PD + escarificação antecedendo a implantação da cultura de verão; cultivo de guandu-anão (*Cajanus cajan* L.) no outono; cultivo de nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) no outono; e plantio direto contínuo. A escarificação reduziu a densidade do solo na profundidade de 0,05 – 0,10 m, em relação aos níveis de compactação PDC e PDA, mas não incrementou o rendimento. O sistema de manejo do solo utilizando a escarificação promoveu alterações significativas nas propriedades físicas do solo, porosidade total e resistência à penetração e aumentou o número de grãos por espigeta. A produtividade do trigo não foi sensível às variações de resistência à penetração, densidade e porosidade do solo resultantes de diferentes níveis de compactação iniciais do solo e dos sistemas de manejo de recuperação do solo.

Palavras-chave: Plantio direto, escarificação do solo, *Cajanus cajan*, *Raphanus sativus*, física do solo.

ABSTRACT

TOIGO, Sonia. Mechanical and biological remediation of the initial compaction on an Oxisol cultivated with wheat. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2010.

Soil compaction is usually observed in soil cultivated at no-tillage system. Soil compaction is caused by accumulation of pressure exerted by machines and animal that travels on the soil. Soil compacted affect the crops development and yield, mainly because decrease the water disponibility, reduce the soil aeration and restrict root growth because increase the soil resistance to penetration. This study was performed at the experimental area of Federal Technological University of Paraná (UTFPR), *Campus Dois Vizinhos*, State of Paraná, Brazil. The present study was carried out with the objective of evaluating the change in soil physical properties and a Wheat grain yield in an Oxisol (Nitossolo Vermelho distroférico, Brazilian Soil Classification System) submitted to three initials compaction levels. The experimental design was a two-factors split-plot arranged in complete random blocks, with three repetitions. The main plots had three compaction levels: continuous no-tillage (PDC); no tillage with chiseling (PDE); no tillage with additional compaction (PDA). The sub-plots had the soil management systems: chiseling every two years; oil seed radish (*Raphanus sativus* L.) cultivated every two years, in the Fall; pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) cultivated every two years, in the Fall; and a control treatment without green manure and chiseling. The results showed that the chiseling reduced bulk density at depth 0,05 – 0,10 m, compared with levels continuous no-tillage and additional compaction, but, did not enhance performance the wheat. The soil chiseling or cover crops cultivate showed effects on the physics soil properties evaluated, total porosity and resistance to penetration and increased the number of grains per spikelet. The wheat yield wasn't sensitive to changes on physics soil properties observed in the soil with different initial levels compaction and soil management systems.

Keywords: no-tillage. soil chiseling. *Cajanus cajan*. *Raphanus sativus*. soil physic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1** – Precipitação mensal observada nos meses de condução do experimento, nos anos de 2008 e 2009. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.30
- Figura 2** – Parcelas com nabo forrageiro (A) e guandu anão (B) aos 60 dias após a semeadura. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.34
- Figura 3** - Vista parcial do experimento, quando a cultura do trigo estava no estágio de perfilhamento (A) e pré-antese (B). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.36
- Figura 4** - Valores médios de Resistência à Penetração (MPa) de um NITOSSOLO VERMELHO em função dos níveis de compactação inicial do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010. 49
- Figura 5** - Valores médios de Resistência à Penetração (MPa) de um NITOSSOLO VERMELHO em função dos sistemas de manejo de recuperação do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010. 50

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Resistência à penetração (Rp), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Pma) e microporosidade (Pmi) do NITOSSOLO VERMELHO Distroférico úmbrico, em função dos níveis de compactação. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.....32
- Tabela 2** – Características químicas do solo utilizado no experimento (média de três repetições). UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010..... 32
- Tabela 3** – Produção de biomassa (matéria verde - MV e matéria seca - MS) da parte aérea e composição nutricional (%) das espécies de plantas de cobertura de solo cultivadas no outono/inverno. Média de 9 repetições. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010. 35
- Tabela 4** - Valores médios de densidade ($Mg.m^{-3}$) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação, sistema de manejo em diferentes profundidades. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010. 40
- Tabela 5** - Valores médios de porosidade total (%) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação, sistema de manejo e profundidade. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010. 43
- Tabela 6** - Valores médios de macroporos (%) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação, sistema de manejo e profundidade. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.46
- Tabela 7** - Valores médios de microporos (%) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação, sistema de manejo e profundidade. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010. 48
- Tabela 8** – Médias das variáveis que compõe o rendimento de trigo cultivado em um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.54
- Tabela 9** – Rendimento de grãos, peso de mil grãos e peso hectolitro de trigo cultivado em um Nitossolo Vermelho sob diferentes níveis de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.56

LISTA DE SIGLAS

ANOVA	Análise da variância
Cfa	Clima subtropical com verão quente
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CV	Coeficiente de variação
Ds	Densidade do solo
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e alimentação
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NC	Níveis de compactação
PD	Plantio direto
PDA	Plantio direto com compactação adicional
PDC	Plantio direto contínuo
PDE	Plantio direto escarificado
PH	Peso Hectolitro
Pma	Macroporosidade
Pmi	Microporosidade
PT	Porosidade total
Rp	Resistência à penetração
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SM	Sistemas de Manejo
SPD	Sistema Plantio Direto
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E OS FATORES DE CRESCIMENTO DE PLANTAS	14
2.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO E A COMPACTAÇÃO DO SOLO	15
2.2.1 Densidade do Solo	17
2.2.2 Porosidade do Solo	18
2.2.3 Resistência à Penetração	21
2.3 RECUPERAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS	22
2.3.1 Escarificação	22
2.3.2 Plantas Descompactadoras	23
2.4 CULTURA DO TRIGO	25
2.4.1 Aspectos Gerais	25
2.4.2 Determinação do Rendimento Potencial	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	29
3.2 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	30
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	32
3.4 AVALIAÇÕES	37
3.4.1 Densidade e Porosidade do Solo	37
3.4.2 Resistência à Penetração	37
3.4.3 Produção da Cultura Teste	37
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 DENSIDADE DO SOLO	39
4.2 POROSIDADE TOTAL	42
4.3 MACROPOROSIDADE	44
4.4 MICROPOROSIDADE	47
4.5 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO	49
4.6 COMPONENTES DE RENDIMENTO	51
4.7 RENDIMENTO DE GRÃOS	55
5 CONCLUSÕES	58
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICES	73

1 INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto, atualmente, está presente em mais da metade das lavouras de grãos brasileiras, chegando a índices de 90% da área plantada no caso das lavouras de soja e de trigo no estado do Paraná.

Na região Sudoeste do Paraná, cujos solos são caracteristicamente argilosos ou muito argilosos, o sistema plantio direto também já é o sistema predominante nas áreas de lavoura, em muitas das quais há mais de uma década. Mais recentemente, em função do aumento da produção leiteira observado nesta região, tornou-se comum a utilização de sistemas de integração lavoura-pecuária, de modo que as lavouras recebem cultivo de grãos no verão, semeados no sistema plantio direto, e pastagens no inverno, que são pastoreadas diretamente pelos animais. Assim, nestas áreas, além do tráfego das máquinas, o solo recebe a aplicação de cargas superficiais resultantes do trânsito dos animais no inverno.

Quando a pressão exercida por máquinas, equipamentos ou animais é superior à capacidade de suporte de carga do solo, ocorrerá compactação. Quando o tráfego acontece em condições de umidade elevada, a probabilidade de ocorrência de compactação é maior ainda, pois o solo torna-se menos consistente. A compactação altera a estrutura do solo, modifica suas relações massa/volume, interferindo na distribuição do tamanho de seus poros e eleva a resistência que o solo oferece à penetração das raízes. Como resultados, são observados reflexos sobre a infiltração, o armazenamento e a disponibilidade de água às plantas, com implicações negativas sobre a produção das culturas.

A ocorrência de variações de produtividade entre as safras agrícolas estão geralmente vinculadas à manifestação de fenômenos climáticos, porém em alguns casos podem estar relacionadas às mudanças na dinâmica da água provocadas pela compactação do solo, justificando-se assim a intensificação de estudos relativos ao assunto. Sua importância cresce à medida que interfere no processo de crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que as propriedades dos solos que as suportam interferem em diversos fatores de crescimento. A textura, a estrutura, a porosidade e a consistência do solo atuam indiretamente no crescimento vegetal, pois atuam sobre a dinâmica do movimento

de água e gases, a condição térmica e a resistência do solo à penetração de raízes, que são fatores de crescimento propriamente ditos (LETEY, 1985).

Como alternativa para implantar sistemas de rotação de culturas com as pastagens, os produtores tem utilizado a cultura do trigo, visando obter rendimentos com a produção de grãos. Entretanto, resultados de pesquisas tem mostrado que esta espécie apresenta sensibilidade às variações do estado de compactação do solo (SECCO et al., 2005), em função das alterações sobre as propriedades físicas do solo, interferindo negativamente sobre o rendimento de grãos. Faz-se necessário, então, estudos que colaborem para a definição de limites críticos ao desenvolvimento desta importante cultura, pois estudos realizados nas condições de clima e solo da região Sudoeste do Paraná, que contemplem tais objetivos ainda são escassos.

Portanto, este trabalho se insere em um esforço para aprofundar o conhecimento sobre o comportamento das plantas crescendo em solos compactados, bem como de alternativas para minorar a degradação física do solo. É necessário identificar os limites críticos para características físicas do solo, de forma a garantir que solos sob sistema plantio direto possuam condições não limitantes à aeração do solo e suprimento de oxigênio às raízes, à infiltração e ao armazenamento de água, de forma a atender a demanda das plantas.

A recuperação de solos compactados requer a aplicação de medidas que permitem o rompimento da camada compactada e, depois, o estabelecimento de um sistema poroso que resista às cargas aplicadas sobre o solo. O rompimento da camada compactada pode ser alcançado com a utilização de equipamentos como o subsolador ou escarificador, dependendo da profundidade em que a mesma se situe. Entretanto, o efeito desse tipo de operação é temporário, uma vez que não há modificações na estrutura do solo e, assim, logo depois de realizada a operação o solo está muito susceptível à compactação.

Com vistas a superar essa limitação das operações meramente mecânicas, têm-se estudado o uso de plantas que possuem um sistema radicular capaz de crescer em solos compactados, como o guandu-anão e o nabo forrageiro. Assim, essas plantas, sendo capazes de atravessar a camada compactada com suas raízes, construiriam um conjunto de canais, que se manteriam efetivos após o seu apodrecimento. Esses canais, por serem verticais estariam menos sujeitos ao efeito destruidor da aplicação de cargas superficiais e, ainda, funcionariam como

passagem para a infiltração de água e para penetração das raízes das culturas subseqüentes, através da camada compactada.

De maneira geral, no Sul do Brasil, o intervalo de tempo entre a colheita de culturas de verão, como soja e milho, e a semeadura da cultura trigo, no inverno, pode atingir cem dias. Diversas espécies vegetais, principalmente leguminosas, têm sido avaliadas para serem cultivadas nesse período, objetivando, fundamentalmente, disponibilizar nutrientes à cultura de trigo (ROSSATO, 2004). Há evidências de que a introdução de espécies consideradas descompactadoras neste período de entressafra (outono) possibilitaria a recuperação das propriedades físicas de solos compactados, com benefícios sobre a produção da cultura comercial, de modo superior ou equivalente ao preparo com escarificação.

Assim, a proposta deste trabalho consistiu em avaliar a eficiência da utilização dos métodos, biológico e mecânico, na melhorias das propriedades físicas de um NITOSSOLO VERMELHO e no incremento do rendimento da cultura do trigo, cultivado em sistema de plantio direto (SPD) sob três níveis iniciais de compactação. Os objetivos específicos foram:

1. Avaliar a influência de diferentes condições físicas do solo, impostas pelos diferentes níveis de compactação e sistemas de manejo do solo, sobre a produção de trigo (*Triticum aestivum* L.).

2. Avaliar o efeito da inclusão de plantas recuperadoras do solo, nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e guandu-anão (*Cajanus cajan* L.), no sistema de rotação de culturas durante a entressafra de outono, sobre as propriedades físicas do solo;

3. Analisar as propriedades físicas do solo após as intervenções com equipamentos de escarificação mecânica;

4. Determinar a duração das modificações nos atributos físicos induzidos pelas escarificações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO E OS FATORES DE CRESCIMENTO DE PLANTAS

O crescimento das plantas é regulado por um conjunto de fatores essenciais que incluem luz, água, calor, oxigênio, nutrientes essenciais (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, B, Mn, Cu, Zn, Mo e Cl) (GIANELLO; GIASSON, 2004), e algo que lhes de sustentação. De maneira geral, para as plantas cultivadas, o solo é o elemento de sustentação, além de ser a fonte primeira de água e nutrientes e do oxigênio necessário à respiração das raízes (REICHART; TIMM, 2004).

Assim, para um perfeito crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário que o solo ofereça condições adequadas para um crescimento irrestrito do sistema radicular, disponibilizando água, oxigênio e nutrientes em quantidades suficientes e de acordo com as necessidades da planta ao longo de todo seu ciclo de vida.

A existência de fluxos adequados de água, nutrientes e oxigênio até o sistema radicular, bem como, a ausência de impedimento mecânico capaz de restringir seu crescimento, é determinada pelas propriedades físicas do solo, especialmente, por uma condição estrutural que determine um sistema poroso contínuo e com poros de diferentes tamanhos ao longo de todo o perfil (CAMARGO; ALLEONI, 2006).

Em geral, em solos compactados, ocorre uma redução da porosidade total, especialmente de macroporos, ao menos em uma determinada camada do perfil, observando-se redução da taxa de infiltração de água no solo e uma diminuição na quantidade de água disponível às plantas. Além disso, em períodos de chuvas intensas pode haver dificuldades nas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera e, em períodos secos, dificuldades para a penetração de raízes (BRAIDA, 2004).

Portanto, o estado de compactação do solo pode alterar os fatores físicos que garantem as condições ideais ao crescimento vegetal. Quando a estrutura do solo é alterada, há influência direta sobre a movimentação de água,

transferência de calor, aeração, resistência à penetração e, também, no fluxo de nutrientes (LETEY, 1985).

Muitos trabalhos têm relatado diminuição da produção de diversas culturas, devido à compactação do solo (SECCO et al., 2009; COLLARES et al., 2008). A redução de produtividade nestas condições, na maioria das situações está associada à condição hídrica, pois quando este fator é suprimido, com o uso da irrigação, por exemplo, a correlação entre o rendimento de grãos e os indicadores da compactação, como a densidade e a macroporosidade, desaparecem (GUBIANI, 2008).

2.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO E A COMPACTAÇÃO DO SOLO

O SPD tem avançado sistematicamente nos últimos anos, motivado, entre outras razões, pelos benefícios creditados ao sistema no que se refere ao controle das perdas de solo por erosão hídrica, com reduções que chegam a índices de 98% (AMARAL et al., 2008). O sucesso é atribuído à palha presente na superfície do solo que dissipa a energia cinética das gotas da chuva, o que desfavorece a primeira etapa do processo erosivo que é a desagregação do solo. Além disso, ao aportar material que intensifica a atividade biológica do solo, verificam-se reflexos positivos sobre as condições químicas e físicas do solo (CASSOL; LIMA, 2003).

No estado do Paraná, dos 350 mil hectares cultivados com trigo, 89,9% são manejados no sistema plantio direto (IGNACZAK et al., 2005). Considerando que, atualmente, as principais limitações relacionadas à fertilidade química do solo estão melhores esclarecidas para o sistema, o monitoramento da qualidade física, nas áreas de plantio direto ganha importância, pois há uma forte evidência de que essa condição possa ser um dos principais determinantes da variabilidade de rendimento observada nas lavouras (SANTI, 2007).

Conforme destacam Reichert et al. (2003), solos com boa qualidade física apresentam uma boa capacidade de infiltração de água, baixo escoamento superficial e adequada porosidade de aeração. A estas características são atribuídas uma adequada retenção e disponibilização de água e, um adequado enraizamento das plantas.

Neste contexto, há a expectativa de que o intervalo compreendido dentro da faixa de umidade volumétrica ótima para o desenvolvimento das culturas,

seja maior no plantio direto do que nos sistemas que envolvem uma maior mobilização do solo, como observou Lima et al. (2006). Isso porque, a maior atividade biológica e a ausência da operação de preparo condicionam o aparecimento e a permanência de canais e galerias contínuas ao longo do perfil do solo, refletindo em maior condutividade hidráulica do solo com conseqüente elevação da água armazenada.

Além disso, solos sob plantio direto, em função do não revolvimento e da manutenção da palhada na superfície, apresentam um enriquecimento de matéria orgânica (LOVATO et al., 2004; CONCEIÇÃO et al., 2005), especialmente nas camadas mais superficiais, com efeitos significativos sobre as condições físicas do solo (BRAIDA, 2004).

Entretanto, apesar dos inegáveis benefícios do estabelecimento de uma rede de canais contínuos ao longo do perfil do solo, bem como do acúmulo de matéria orgânica, os solos manejados no sistema plantio direto adquirem condições físicas diferentes, mas não necessariamente melhores, daqueles solos submetidos ao preparo convencional.

Neste sentido, a adoção do sistema plantio direto, principalmente em solos de textura argilosa, tem despertado preocupação para uma provável degradação estrutural do solo, subsidiada por dados de pesquisa que demonstram redução da macroporosidade (BEUTLER et al., 2004), elevação da densidade do solo (COSTA et al., 2003; REINERT et al., 2008), e elevação da resistência à penetração (TOIGO et al., 2007; MARTINAZZO, 2006).

Tais condições revelam um processo de compactação superficial, a partir do qual, a aeração e a taxa de infiltração de água são reduzidas, conseqüentemente, o escoamento superficial de água pode aumentar e o crescimento das plantas ser reduzido em virtude da restrição imposta ao crescimento de raízes, da diminuição da disponibilidade de água e aeração deficiente (REICHERT et al., 2007).

A compactação do solo, é apontada como um dos principais problemas ocasionados pela ausência do revolvimento do solo associada ao tráfego intensivo de máquinas agrícolas e ou animais. Soane e Ouwerkerk (1994) a definem com sendo um processo de densificação no qual a porosidade e a permeabilidade são reduzidas e a resistência do solo é aumentada.

A pressão exercida pelas máquinas ou animais sobre o solo é o agente causador da compactação. No caso das máquinas agrícolas utilizadas nas várias etapas do processo de produção, a compactação ocorre tanto pelo número exagerado de operações (SILVA et al., 2006; NOVAK et al., 1992) como pelo simples tráfego sobre o solo (SILVA et al., 2007), especialmente quando é realizado em solo sob condições inadequadas, como, por exemplo o excesso de umidade.

Hakansson e Petelkau (1994), mencionam que máquinas que possuem elevado peso por eixo, são responsáveis pela aplicação de altas pressões de contato sobre o solo, conduzindo a compactação subsuperficial, além disso, a repetição de passadas possui efeitos cumulativos. Já a compactação superficial estaria mais relacionada à pressão de inflação dos pneus.

De acordo com Hillel (1998), a compactação é uma conseqüência indesejada da mecanização que reduz a produtividade biológica do solo e, em casos extremos, o torna inadequado ao crescimento de plantas.

Silva (2003) conduziu um estudo com o objetivo principal de relacionar os estados de compactação identificados em lavouras sob plantio direto com algumas propriedades físicas do solo e produtividade de trigo. Os resultados encontrados demonstraram que a produtividade do trigo foi reduzida em 18 % ou $0,42 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no tratamento com maior estado de compactação em relação à produtividade na situação de menor estado de compactação.

Assim sendo, é necessário identificar parâmetros de qualidade do solo que permitam o monitoramento e a identificação de problemas nas áreas de lavoura, de modo que se estabeleçam estimativas realistas do comprometimento da produção resultantes das alterações imprimidas ao solo, em função dos manejos adotados. Finalmente, estas informações serão úteis para a tomada de decisão sobre possíveis intervenções no manejo do solo com vistas ao estabelecimento de uma agricultura mais sustentável.

2.2.1 Densidade do Solo

A densidade do solo (D_s) é a razão entre massa do solo seco e o volume e reflete, portanto, o equilíbrio entre as fases sólida, líquida e gasosa (BRADY, 1989), além de ser indicativa da estrutura do solo e ser usada como medida do estado de compactação do solo (REICHART; TIMM, 2004), processo no

qual, é observado aumento da densidade em função da eliminação do espaço vazio ocupado pelo ar (PINTO, 2006).

A textura exerce influência sobre os valores de densidade (REICHERT et al., 2009), solos argilosos naturalmente tendem a ter densidade de 1,0 a 1,3 g.cm⁻³ (MELLO, 2002; KIEHL, 1979).

A Ds é um critério fundamental para o estudo da compactação, apesar de não afetar diretamente o crescimento das plantas. No entanto, em função de seu aumento ocorrem mudanças em outras propriedades como alteração do espaço poroso, principalmente os macroporos, influenciando em aspectos relacionados à disponibilidade de água às plantas, aeração e a resistência do solo à penetração (SOANE; OURWERKERK, 1994).

O uso e o manejo do solo alteram a sua densidade. Quando não há mobilização da superfície no preparo do solo, os valores de densidade são mais altos (SECCO et al., 2005). Bertol et al. (2004), observaram aumento de 19% da densidade em sistema de semeadura direta comparada ao sistema convencional.

Limites de densidade do solo aceitáveis para crescimento e rendimento de culturas adequado, evitando ou minimizando a degradação ambiental ainda não estão esclarecidos. Entretanto, Reichert et al. (2003), com base na teoria do intervalo hídrico ótimo, citam que valores de Ds associados ao estado de compactação com alta probabilidade de oferecer riscos de restrição ao crescimento radicular situam-se em torno de 1,25 e 1,30 Mg.m⁻³ para solos argilosos (>60 % argila).

Collares (2005), determinou que a densidade do solo restritiva a produtividade do feijão e do trigo, cultivados em um Latossolo argiloso, foi de 1,4 a 1,5 Mg.m⁻³, respectivamente. Secco et al., (2009) ao compararem estados de compactação encontraram rendimento de trigo 18,35 % inferior para o tratamento com maior estado de compactação, caracterizado por apresentar valor de densidade de 1,62 Mg.m⁻³ e resistência a penetração de 2,65 MPa.

2.2.2 Porosidade do Solo

A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada com ar e, ou, água, representando o local onde circulam e ocorrem os processos dinâmicos envolvendo a solução (água e nutrientes) e o ar do solo (BRADY, 1989).

Trata-se de uma propriedade que reflete a qualidade estrutural do solo, e conseqüentemente, do ambiente radicular, descrevendo os fatores geométricos dos poros, pois são resultados de partículas grandemente variáveis em tamanho, forma e características superficiais (KLAR, 1984). De acordo com a proposta de Kiehl (1979) destaca-se a separação dos poros em duas classes: macroporos, quando os poros têm diâmetro maior do que 0,06 mm, e microporos, quando os poros são menores do que 0,06 mm.

A macroporosidade, em solos argilosos, é formada, basicamente, pelos espaços existentes entre agregados, e por galerias produzidas pela atividade biológica, incluindo o crescimento de raízes que aproximam os agregados e os unem (HILLEL, 1998). Tradicionalmente, definem-se os macroporos como responsáveis pela rápida drenagem da água gravitacional do solo, assumindo importância na redução do risco da erosão, ao evitar que a água escorra em superfície, além de condicionarem a circulação de gases para a respiração das raízes (MELLO, 2002).

É imprescindível que no espaço poroso do solo exista uma proporção mínima de poros livres de água de 10% ou $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, para evitar deficiência na aeração do sistema radicular das plantas (KLEIN, 2008). Em solos severamente compactados, sob condições de elevada umidade, a aeração insuficiente é um dos fatores que limitam o crescimento radicular, em função de que o oxigênio disponível na rizosfera, pode ser limitante para o desempenho dos processos metabólicos da planta. Conseqüentemente, há uma redução do volume de solo explorado pelo sistema radicular, com reflexos sobre a disponibilidade de nutrientes e água acessados pelas raízes.

O manejo destinado ao solo, resulta em modificações significativas sobre a porosidade, com efeitos de maior magnitude sobre os poros interagregados enquanto os poros dentro dos agregados sofrem pequenas alterações em razão da sua maior estabilidade (SILVA, 2003).

O tráfego de máquinas, notadamente produz alterações neste sentido, como, observaram Tormena, Roloff e Sá (1998), em estudo no qual constataram que a porosidade de aeração foi reduzida, em média, 91% na entrelinha trafegada, comparada àquela sem tráfego. Os valores médios de porosidade de aeração foram de $0,01$ e $0,014 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na área com tráfego, e de $0,165$ e $0,203 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na área sem

tráfego. Fontanela (2008) constatou que o tráfego tornou o solo menos permeável ao ar, afetando a continuidade e distribuição de tamanho de poros.

A redução da macroporosidade é um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação. Durante a passagem dos maquinários agrícolas sobre o solo, os espaços vazios são reduzidos em tamanho e tem sua forma modificada, além de serem interrompidos e até mesmo, desaparecerem completamente. Os efeitos são mais pronunciados nos poros de maior diâmetro, ou seja, os macroporos. A porosidade total, também é reduzida, mas em menor proporção, visto que, há incremento da microporosidade (KOOISTRA;TOVEY, 1994).

Neste sentido, Klein e Libardi (2002), estudando as alterações na densidade do solo e sua implicação na porosidade total e de aeração, observaram que áreas cultivadas em sistema de sequeiro e irrigadas, em comparação com a mata, tiveram a sua estrutura modificada, com efeitos mais pronunciados na profundidade de 0,10 m, onde constataram redução da porosidade total em torno de 12 %, enquanto os macroporos foram reduzidos em 24 %, evidenciando a maior suscetibilidade dos macroporos em sofrer alterações.

Os microporos são definidos como poros de armazenamento de água. Menor volume total de poros e maior microporosidade são comuns em solos compactados (VEIGA, 2005). Essas modificações sobre a geometria porosa podem significar aumento da retenção de água, conforme observou Rosa (2009), ao avaliar as implicações da adoção do plantio direto sobre as propriedades físico-hídricas de um Latossolo Argiloso. O aumento do tempo de implantação (plantio direto há 14 anos) elevou a microporosidade, resultando em maior retenção de água.

No entanto, em algumas situações, não significa que essa água esteja necessariamente disponível para as plantas, pois existem situações em que estes poros sofrem intensa redução e a água pode permanecer retida com energia muito alta, sendo, portanto, indisponível às plantas (KLEIN et al., 2009).

A maior proporção de microporos encontrados no plantio direto pode determinar, em períodos prolongados de precipitação, condições de aeração deficiente podendo dificultar o crescimento radicular, com reflexos sobre o desenvolvimento inicial das culturas. Além disso, a condutividade do solo saturada é reduzida, favorecendo o escoamento superficial de água em chuvas de alta intensidade (SANTI, 2007).

2.2.3 Resistência à Penetração

Um dos indicadores de compactação no solo é a resistência do solo à penetração (R_p), que descreve a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, como as raízes em crescimento. A R_p exerce grande influência sobre o desenvolvimento vegetal, uma vez que o crescimento das raízes, tal como a produtividade das culturas, variam de forma inversamente proporcional ao seu valor (LIMA et al., 2010; GIRARDELLO, 2010).

Além de constituir-se em um bom indicativo da qualidade física do solo, é intensivamente utilizada como medida do estado de compactação do solo, pela praticidade e rapidez na obtenção dos resultados, úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade (SILVA, 2003).

A resistência mecânica à penetração em uma área agrícola pode vir a comprometer a sua capacidade produtiva por reduzir ou impedir o crescimento do sistema radicular e, conseqüentemente, da parte aérea das plantas. Inicialmente são observados redução da matéria seca de raízes, para posteriormente reduzir a matéria seca da parte aérea e por último a produção de grãos (BEUTLER; CENTURION, 2004).

A presença de zonas compactadas no solo restringe o crescimento radicular naquele ponto e as raízes são induzidas a crescer em outra direção, como constatou Collares, et al. (2008), em tratamento com compactação adicional a R_p restringiu o crescimento de raízes, concentrando-o na camada superficial até os 0,10 m, com indícios claros de deformação e aparecimento significativo de raízes secundárias.

Solos cultivados a vários anos sob plantio direto, tendem a apresentar maiores valores de R_p na camada de 0,07 a 0,15 m (ABREU et al., 2003). O tráfego mais intenso define, ainda, aumento da resistência a penetração nas laterais da lavoura, ditas cabeceiras, reduzindo-se para o centro da lavoura (SILVA et al., 2004).

Os valores críticos experimentais e citados na literatura de resistência mecânica à penetração nos quais ocorre impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular limitando a produtividade das culturas são divergentes e variam com o tipo de solo e espécie em estudo. Genericamente, são

apresentados valores que vão de 1.5 MPa (PEDROTTI, et al., 2001) até 3.0 MPa (REICHERT et al., 2007).

Suzuki (2005) ao avaliar o sistema radicular da soja em diferentes manejos, caracterizados por apresentarem distintos estados de compactação, em um Latossolo Vermelho distrófico típico considerou que o valor de 2 MPa, considerado por muitos autores, crítico para o desenvolvimento radicular, é subestimado, já que observou raízes em profundidades maiores do que a profundidade que apresentou resistência de 2 MPa.

Decréscimos de produtividade na cultura da soja foram reportados por Beutler et al. (2007), ao avaliarem o efeito do tráfego quando a resistência a penetração atingiu valores de 2,33 MPa. Secco (2003), estudando o efeito de estados de compactação em um Latossolo Vermelho distrófico e num Latossolo Vermelho distroférrico, ambos manejados sob sistema de plantio direto, verificou que o estado mais intenso de compactação, com valores de densidade de 1,62 e 1,54 Mg.m^{-3} e de resistência à penetração de 2,65 e 3,26 MPa, proporcionou decréscimos na produtividade do trigo de 18,35 e 34,05 %, respectivamente. Carvalho et al. (2006), observou que valores de R_p variando entre 1,29 a 2,87 MPa não restringiram a produtividade de grãos da cultura do feijão.

2.3 RECUPERAÇÃO DE SOLOS COMPACTADOS

2.3.1 Escarificação

Frente ao problema da compactação do solo, alguns agricultores, ainda que esporadicamente, utilizam a mobilização do solo através de escarificadores e subsoladores visando corrigir essa limitação. A vantagem da utilização destes implementos comparados ao uso do arado ou grade, está no fato destes não promoverem uma inversão de camadas, obtendo-se com isto, menor alteração da estrutura do solo (RECOMENDAÇÕES ..., 2003).

A escarificação reduz os efeitos negativos da compactação, diminuindo a densidade do solo e sua resistência à penetração (ABREU et al., 2004), melhora o ambiente do solo para o armazenamento e movimento de água, fatores que promovem maiores produtividades de plantas (VEIGA et al., 2006). Conforme resultados apresentados por Rosa (2009), o solo escarificado por dois anos

apresentou boas condições estruturais para o desenvolvimento das culturas, pois apresentou menor densidade na linha de tráfego e maior porosidade total.

Camara e Klein (2005), verificaram que a escarificação resultou em uma capacidade significativamente maior de condução da água, com valores oito vezes superiores ao plantio direto. Tal fato, estaria relacionado à ocorrência de superfícies mais rugosas, que poderiam estar incrementando a infiltração de água no solo, diminuindo o escoamento superficial e os riscos de erosão hídrica.

A cultura do trigo respondeu positivamente as alterações nas propriedades físicas do solo, provocadas pela escarificação, produzindo, em média, $0,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ a mais, comprovando o efeito positivo da escarificação do solo sobre o desenvolvimento e o rendimento da cultura do trigo (KLEIN et al., 2008).

O emprego da escarificação em solos com camadas compactadas resultou em efeitos positivos sobre suas propriedades físicas (PIKUL JR; AASE, 1999; AKINCI et al., 2004; OLESEN; MUNKHOLM, 2007). Entretanto, Pikul Jr. e Aase (1999), trabalhando com um solo franco-arenoso verificaram que depois de 2,5 anos, apesar de ainda existir diferenças nas propriedades físicas do solo, o rendimento do trigo na área escarificada não foi diferente das áreas sob plantio direto contínuo. Isso foi corroborado por Diaz-Zorita (2000) e Akinci et al. (2004), que verificaram que os efeitos da escarificação desapareceram, quase completamente, a partir do segundo ano de sua realização, respectivamente, em solos de textura franca e de textura argila siltosa.

Portanto, com base nos trabalhos citados acima é possível inferir que o efeito desse tipo de operação é temporário, pois, depois de realizada a operação o solo estará novamente susceptível à compactação, uma vez que a capacidade de suporte de carga do solo é reduzida (menor pressão de preconsolidação) (VEIGA et al., 2006).

2.3.2 Plantas Descompactadoras

A inclusão de plantas de cobertura no sistema agrícola, pode modificar positivamente as propriedades do solo, como elevar a macroporosidade, a porosidade total e reduzir a densidade do solo (ARGENTON, 2005). Estas alterações, relacionam-se com a melhoria da qualidade física do solo, constituindo-

se em método alternativo à escarificação mecânica, denominada, segundo Nicoloso et al. (2008), como método biológico.

O uso do método biológico, como potencialmente capaz de aliviar o problema da compactação, está fundamentado na atuação do sistema radicular pivotante característico de algumas espécies. Após sofrer decomposição, as raízes deixam canais responsáveis pelo aumento do espaço poroso do solo, principalmente os macroporos, que facilitam o movimento de água e promovem a difusão de gases (JIMENEZ et al., 2008).

Poros formados pela ação das raízes no solo são mais estáveis, pois durante a decomposição dessas, pela ação de microrganismos, são gerados materiais que atuam como cimentantes nas paredes desses poros, proporcionando maior durabilidade, se comparados com aqueles formados por implementos mecânicos (GENRO JUNIOR et al., 2004).

Dentre os resultados promissores, envolvendo espécies que podem configurar-se em alternativa, destacam-se o nabo forrageiro e guandu anão. O potencial destas plantas é evidenciado, devido as características inerentes a elas, tais como: rusticidade, precocidade, facilidade de manejo e grande produção de matéria seca.

Com relação ao guandu anão, as características preconizadas se confirmam, como destaca, Bordin et al. (2008), que observou produção de matéria seca superior a 12 Mg.ha^{-1} . Visando a melhoria das condições físicas do solo, devida, a formação de bioporos, é importante enfatizar, a habilidade desta espécie em crescer em solos compactados (FOLONI et al., 2006), produzindo grande quantidade de raízes, como observado por Redin (2010), onde a produção de fitomassa radicular foi de $1,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$.

Efeitos contundentes da utilização do nabo foram observados por Rossato (2004), onde o rendimento de grãos de trigo foi 8% superior ao tratamento que ficou em pousio. Kochhmann et al. (2009), reafirmam esta tendência, o nabo forrageiro aumentou, significativamente, a produtividade de trigo, quando utilizado como cultura intercalar ao milho e ao trigo em relação ao pousio, a partir de, produções de fitomassa superiores a 3 Mg.ha^{-1} .

2.4 CULTURA DO TRIGO

2.4.1 Aspectos Gerais

A cultura do trigo constitui-se numa das mais importantes explorações agrícolas do Brasil, não só pela área cultivada e pelo valor da produção como, também, por se tratar de um alimento básico da população brasileira.

O trigo cultivado comercialmente no Brasil pertence à espécie *Triticum aestivum* L. (OSÓRIO, 1992), que também é produzido em quase todas as partes do mundo, pela sua facilidade de adaptação aos ambientes mais diversos e por apresentar grande valor para a panificação (HAMADA, 2000). Isto permite ao trigo, ser o segundo cereal mais cultivado no mundo, chegando a 600 milhões de toneladas produzidas, sendo superado apenas pelo milho com 780 milhões de toneladas (FAOStat, 2009). É, no entanto, o grão mais comercializado mundialmente, correspondendo a 35,63% do total. A produção nacional de trigo é da ordem de 4,9 milhões de toneladas (IBGE, 2009), da qual, o estado do Paraná é responsável por 52,1% da produção nacional (CONAB, 2010).

O país é tradicionalmente um importador de trigo em grão, apresentando elevada dependência externa do abastecimento do cereal, atendendo à ordem de 57% da demanda, no período compreendido entre 2003 a 2008 (CONAB, 2010). Dados recentes informam que o consumo brasileiro foi estimado em 10,2 milhões de toneladas, sendo necessário, portanto, a importação de 6,4 milhões de toneladas.

Cumprе salientar, que no Brasil a área média ocupada com a cultura é de 14% da área apta disponível para este cereal (REUNIÃO ..., 2002), o que demonstra as possibilidades de expansão da triticultura. Outro aspecto que pode ser intensificado é a produtividade média. Embora constitua um dos principais cereais do segmento produtivo agrícola no Brasil, o trigo apresenta, ainda, baixa produtividade, em torno de 2,13 Mg.ha⁻¹ (IBGE, 2010), com grandes variações de uma safra para outra. Entretanto há expressivo número de lavouras de trigo do Estado do Paraná que obtêm produtividades acima de 3.0 Mg.ha⁻¹, permitindo inferir que em função da tecnologia disponível, há possibilidades da produção ser aumentada através deste fator.

Essa baixa produtividade está relacionada principalmente, por fatores climáticos, como as chuvas excessivas que propiciam uma maior incidência de doenças causando prejuízos às lavouras, tanto em qualidade quanto em quantidade dos grãos. Historicamente, os meses de setembro e outubro, em que tradicionalmente se dá a colheita do trigo, apresentam médias de pluviosidade elevadas, respectivamente, de 174,5 e 239,1 mm, para o município de Dois Vizinhos, PR (POSSENTI et al., 2007). Além disso, elevados períodos de molhamento foliar, proporcionados por ocorrência sucessiva de precipitações, não constituem clima favorável para o trigo, principalmente por condicionarem perdas por causa da incidência de doenças e problemas radiculares. O excesso hídrico também é citado por associar-se negativamente com peso hectolitro e peso de mil grãos (GUARIENTI et al., 2003).

Outro entrave que merece destaque na região, é a notável falta de estrutura em logística por parte das cooperativas e cerealistas, para poderem separar os diferentes tipos de trigo durante a recepção do cereal. Este fato faz com que eventuais diferenças de preços pagos pelo mercado comprador de trigo não sejam repassados aos produtores, com implicações diretas sobre a consolidação da triticultura como uma atividade econômica rentável e viável.

2.4.2 Determinação do Rendimento Potencial em Trigo

O rendimento de grãos pode ser expresso como o produto das seguintes variáveis: número de grãos por m^2 , número e comprimento de espigas, número total de espiguetas, grãos por espiga e peso de grãos. O impacto de cada componente do rendimento na produção de grãos final é determinado em fases diferentes do desenvolvimento da planta (FOWLER, 2002), havendo relações de caráter compensatório entre os mesmos.

O ciclo de crescimento do trigo é dividido em quatro fases de desenvolvimento: perfilhamento, alongamento, espigamento e maturação. A fase vegetativa estende-se da sementeira, envolvendo germinação de sementes e a emergência das plantas, até o estágio de duplo-anel. Compreende a etapa em que, no ponto de crescimento são diferenciadas somente estruturas foliares (CUNHA et al., 2002).

Relativamente ao período vegetativo, o adequado estabelecimento da cultura, por meio de um satisfatório processo germinativo, exerce influência de maneira positiva sobre um dos fatores determinantes do rendimento final, a quantidade de plantas e, conseqüentemente o número de inflorescências ou espigas por área, que poderão ser substancialmente multiplicados durante o período do perfilhamento. Assim, a emissão, o desenvolvimento e a sobrevivência de afilhos são de extrema importância para alcançar altos rendimentos de grãos, pois, este caráter está diretamente relacionado ao número de espigas por unidade de área (VALÉRIO et al., 2008). Dentre os aspectos envolvidos na produção e sobrevivência dos perfilhos destacam-se a disponibilidade de água, nutrientes e boas condições físicas do solo (SILVA et al., 2008).

Mais adiante, no decorrer do ciclo da cultura, acontece um outro evento fenológico importante para a definição do rendimento potencial em trigo, o período denominado de espiguetas terminal-antese, caracterizado como a etapa de crescimento da espiga no interior do colmo (pré-espigamento), visualmente identificado em lavoura por coincidir com o início da alongação dos colmos. Neste momento, inicia-se a fase reprodutiva, evidenciando a diferenciação de estruturas florais e o número de flores férteis, cujo processo define potencialmente o número de grãos (CUNHA, 2002).

Ao ser diferenciada a espiguetas terminal, definem-se o número de espiguetas por espiga, consideradas importantes componentes do rendimento (MUNDSTOCK; BREDEMEIER, 1999). De acordo com Freitas et al. (1985), quando o número de grãos por espiga e o número de espiguetas sem grãos por espiga são definidos, a planta apresenta-se mais sensível a deficiência hídrica, provavelmente devido à sensibilidade do pólen à restrição à água. Sob condições desfavoráveis de umidade no solo, pode haver esterilidade do estame, provocando sucessiva inviabilidade do grão de pólen, conseqüentemente, reduzindo o número de espiguetas desenvolvidas.

O número de grãos por espiga tem sido citado como o fator de maior efeito sobre o rendimento de grãos, conforme Destro et al. (2001), pois este componente configura-se em maior número de drenos, com influência sobre os processos de translocação e acúmulo de assimilados fotossintéticos na planta, favorecendo o direcionamento dos mesmos para a espiga além de relacionar-se

com o aumento do índice colheita, apontado por Rodrigues (2002), como principal responsável pelo aumento da produtividade em cultivares de trigo contemporâneas.

Segundo, Freitas et al. (1985) é um dos componentes mais relacionados com a produção final de grãos das plantas de trigo e apresenta elevada sensibilidade a condições ambientais adversas.

O peso de grãos é o último componente a ser definido. Nas primeiras semanas que sucedem a polinização o grão começa a acumular amido e proteína e o aumento de peso seco e linear, até atingir o máximo acúmulo em torno de três semanas. Condições ambientais adversas durante um dos períodos de crescimento do grão são responsáveis por reduzir a taxa de acúmulo de matéria seca e a produção diminui (SIMMONS, et al., 1995). Destaca-se a área fotossinteticamente ativa como fator determinante nesta fase.

De maneira geral, o número de grãos é determinado antes da antese e, após esse estágio os grãos são de fato enchidos e é estabelecida a sua massa seca final no momento da maturação fisiológica. Esta condição faz com que, os períodos em que há maior comprometimento do rendimento final, estão sujeitos a diferentes disponibilidades de ambiente, com possíveis conseqüências para a expressão do potencial de rendimento de grãos da cultura, por razões atreladas às variações de radiação solar, de temperatura e precipitações (FRANCESCHI, 2009).

As espécies, de maneira geral, possuem um estágio de desenvolvimento no qual, as condições ambientais adversas causam maior redução no rendimento de grãos. No caso de trigo, isso ocorre do estágio de folha-bandeira ao estágio de antese (SANTOS et al., 2009; RODRIGUES et al., 1998). Freitas e Camargo (1987) atribuíram como período crítico para rendimento de grãos o início da emergência da última folha (folha-bandeira) até a fase farinácea. Cunha et al., (2002), descrevem a existência de um período crítico concentrado em curto espaço de tempo que antecede a antese, mais propriamente no subperíodo delimitado pelos estádios de início de formação da espiguetta terminal e de antese.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi elaborado a partir dos resultados obtido em um experimento instalado na Estação Experimental do *Campus Dois Vizinhos* da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, cujas coordenadas geográficas são 25°42' de latitude Sul e 53°06' de longitude a Oeste de Greenwich e 520 m de altitude. A área destinada à instalação do experimento vinha sendo cultivada nos últimos sete anos em sistema plantio direto, com sucessão de culturas no inverno (trigo, aveia) e no verão (milho e soja).

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ÁREAS DE ESTUDO

O clima da região é classificado como Cfa, segundo o sistema proposto por Köppen, isto é, subtropical úmido, sem estiagem típica. A distribuição de chuva ao longo do ano não é regular, a precipitação média mensal é superior a 150 mm na maioria dos meses, sendo abaixo deste valor apenas nos meses de março, julho e agosto. O volume total de precipitação anual é de 2044 mm (POSSENTI et al., 2007). A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e do mês mais frio é superior a 3°C e inferior a 18°C.

A distribuição das chuvas durante o período de condução do experimento é mostrada na Figura 1. O gráfico foi elaborado a partir de dados climáticos gerados na Estação Meteorológica conveniada ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e ao Sistema Meteorológico do Paraná – SIMEPAR, instalada na Estação Experimental do *Campus Dois Vizinhos* da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, distante cerca de 500 m do experimento.

O solo da área experimental pertence à unidade de mapeamento NITOSSOLO VERMELHO Distroférrico úmbrico, textura argilosa fase floresta subtropical perenifólia, relevo ondulado (BHERING et al., 2008), que se caracteriza pela coloração vermelho escura, perfil profundo e boa drenagem. No início do estudo foram coletadas amostras parcialmente deformadas que, depois de secadas ao ar, foram submetidas às seguintes análises físicas: densidade de partículas pelo método do balão volumétrico e análise granulométrica pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997). A textura do solo é argilosa, apresentando na camada de 0,0 –

0,25 m de profundidade, teores médios de argila, silte e areia de 0,66 , 0,32 e 0,02 kg.kg^{-1} , respectivamente, e densidade de partículas média de 2,30 Mg.m^{-3} .

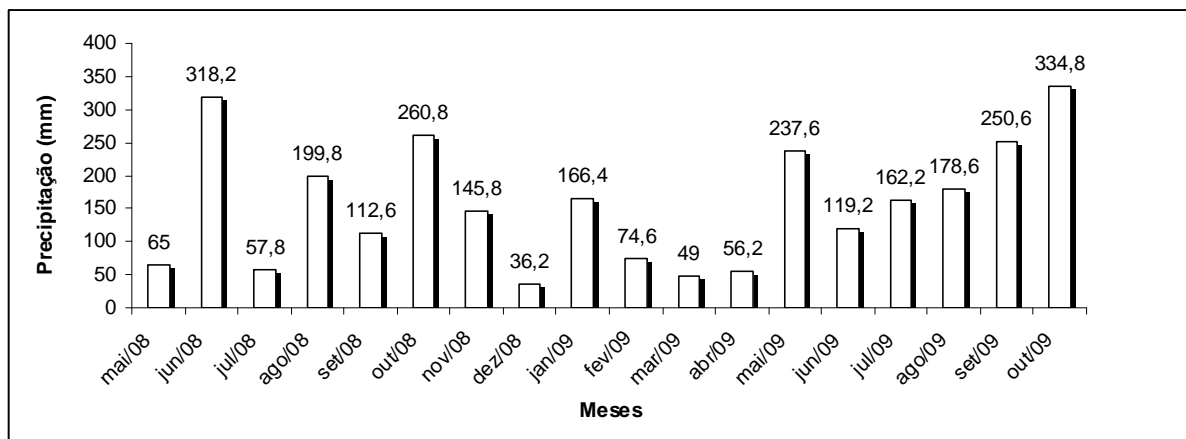


Figura 1 – Precipitação mensal observada nos meses de condução do experimento, nos anos de 2008 e 2009. Dois Vizinhos, PR, 2010.

3.2 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os tratamentos utilizados são o resultado da combinação de dois fatores: nível inicial de compactação e sistemas de manejo para recuperação do solo, instalados em um delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas e com três repetições. Nas parcelas principais foram aplicados os três níveis de compactação, caracterizados a seguir:

1. PDE – Plantio direto escarificado, fazendo-se uma escarificação em maio de 2008 na área que até então vinha sendo cultivada no SPD.
2. PDC – Plantio direto contínuo, mantendo-se o solo sem revolvimento, conforme vinha sendo cultivado há sete anos;
3. PDA – Plantio direto com compactação adicional, obtido mediante a aplicação de compactação adicional realizada em maio de 2008 na área que vinha sendo cultivada no SPD.

Após o estabelecimento dos níveis iniciais de compactação as parcelas foram cultivadas em SPD e nas subparcelas foram aplicados os seguintes sistemas de manejo para recuperação do solo:

1. PD + Escarificação – Plantio direto com a aplicação de uma escarificação, na profundidade de 0,0 – 0,25 m, antecedendo a implantação da cultura de verão milho (*Zea mays*);

2. PD + Guandu – Plantio direto com cultivo de guandu-anão (*Cajanus cajan L.*), no outono e em sucessão à cultura de verão (milho) e antecedendo a cultura do inverno, trigo (*Triticum aestivum*);

3. PD + Nabo – Plantio direto com cultivo de nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), no outono em sucessão à cultura de verão (milho) e antecedendo a cultura do inverno (trigo);

4. PD – Lavoura contínua em plantio direto, sem aplicação de escarificação ou de plantas descompactadoras.

A parcela principal tinha área total de 88 m² (5,5 m de largura por 16 m de comprimento), e a subparcela, 22 m² (5,5 m de largura por 4 m de comprimento). A sucessão de culturas comerciais utilizadas foi Milho – Trigo, incluindo-se as plantas de cobertura, o intervalo entre a cultura do milho e do trigo, nas parcelas correspondentes.

Em novembro de 2008 foi realizada uma amostragem para caracterização inicial dos níveis de compactação, coletando-se amostras em anéis volumétricos de aço inoxidável com volume de aproximadamente 0,85 m³ (0,06 m de diâmetro e 0,03 m de altura) nas camadas com profundidade de: 0 - 0,05 m, 0,05 - 0,10 m, 0,10 - 0,15 m, 0,15 - 0,20 m, 0,20 - 0,25 m. Em cada nível de compactação, foram feitas duas amostragens por parcela com três repetições. Estas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo, a porosidade total a macroporosidade e a microporosidade, seguindo a técnica do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Na mesma data, determinou-se a resistência à penetração do solo, utilizando um penetrômetro eletrônico marca EIJKELKANP, com ponta (cone) de 1cm² de área. As leituras foram registradas verticalmente a cada 0,01 m até a profundidade de 0,25 m. Foram feitas 5 repetições (penetrações) por tratamento. Os resultados desta caracterização inicial são mostrados na Tabela 1.

Foram coletadas, amostras que foram submetidas à análise química de rotina para avaliação da fertilidade, necessidade de corretivos e adubação. Os resultados destas análises são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Resistência à penetração (Rp), densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Pma) e microporosidade (Pmi) de um NITOSSOLO VERMELHO distroférico úmbrico, em função dos níveis de compactação.

Nível de compac.	Prof. (m)	Rp (MPa)	Ds (Mg.m ⁻³)	PT (%)	Pma (%)	Pmi (%)
PDE¹	0,00 a 0,05	0,61	1,06	73,24	30,89	42,35
	0,05 a 0,10	1,19	1,33	63,89	16,87	47,02
	0,10 a 0,15	1,58	1,36	62,60	14,43	48,17
	0,15 a 0,20	1,79	1,34	68,50	20,43	48,07
	0,20 a 0,25	1,99	1,27	69,30	14,30	55,00
Média		1,43	1,27	67,51	19,38	48,12
PDC	0,00 a 0,05	1,92	1,13	63,32	16,89	46,43
	0,05 a 0,10	2,52	1,36	60,61	10,99	49,62
	0,10 a 0,15	2,61	1,40	59,00	11,07	47,93
	0,15 a 0,20	2,55	1,37	58,74	10,14	48,60
	0,20 a 0,25	2,39	1,32	62,29	10,07	52,22
Média		2,40	1,32	60,79	11,83	48,96
PDA	0,00 a 0,05	2,74	1,17	65,14	21,95	43,19
	0,05 a 0,10	2,30	1,43	57,76	9,41	48,35
	0,10 a 0,15	3,41	1,42	59,67	13,12	46,55
	0,15 a 0,20	3,36	1,40	62,29	11,23	51,06
	0,20 a 0,25	3,18	1,34	63,61	12,40	51,21
Média		3,00	1,35	61,69	13,62	48,07

¹ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional

Tabela 2 – Características químicas do NITOSSOLO VERMELHO utilizado no experimento nos diferentes níveis de compactação e profundidades de amostragem.

Determinações	PDE ¹		PDC		PDA	
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m
M.O. ² (g.kg ⁻¹)	42,44	31,27	40,21	31,27	38,42	29,48
pH (CaCl ₂)	5,93	5,40	6,00	5,47	6,00	5,33
P (mg.dm ⁻³)	10,30	1,96	9,40	4,84	6,13	2,29
K (cmol _c .dm ⁻³)	0,30	0,10	0,32	0,09	0,27	0,07
Al (cmol _c .dm ⁻³)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ca (cmol _c .dm ⁻³)	7,12	5,09	6,86	5,29	7,23	4,73
Mg (cmol _c .dm ⁻³)	4,28	3,11	4,11	3,17	4,10	3,12
CTC (cmol _c .dm ⁻³)	14,74	11,96	14,11	11,73	14,55	11,18
H+Al (cmol _c .dm ⁻³)	3,04	3,35	2,82	3,18	2,96	3,26

¹ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional

² M.O. = Matéria Orgânica

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A instalação do experimento iniciou em maio de 2008, quando após escolher e demarcar a área, foi realizada a compactação adicional do solo nas parcelas correspondentes a este tratamento (PDA), utilizando-se um trator John

Deer modelo 5600 4x4, com massa em ordem de embarque de 4,5 Mg, pneus Standar dianteiros 9,5x24R1 e traseiros 14,9x24R1, tendo um pulverizador montado Jacto (0,250 Mg) abastecido com 600 litros de água. A compactação foi realizada em duas etapas, ambas após período de chuvas intensas, estando o solo com umidade entre a capacidade de campo e a saturação, passando-se o trator três vezes sobre o mesmo local e em toda a área da parcela.

Na mesma época, porém em dias nos quais o solo estava menos úmido, próximo ao ponto de friabilidade, realizou-se uma escarificação nas parcelas correspondentes ao menor nível de compactação (PDE), assumindo-se que a escarificação foi suficiente para romper a compactação pré-existente. Para tanto se utilizou um subsolador de sete hastes marca Stara, regulado para trabalhar na profundidade de 0,25 m estando as hastes espaçadas de 0,50 m. No inverno de 2008 as parcelas permaneceram em pousio, deixando-se que a vegetação espontânea se desenvolvesse naturalmente. Embora o equipamento utilizado tenha sido um subsolador, optou-se pelo uso do termo escarificação, baseado na profundidade da operação (0,25 m).

Em agosto de 2008, realizou-se a escarificação nas sub-parcelas correspondentes ao manejo do solo com escarificação, utilizando para tal o equipamento com as mesmas especificações citadas anteriormente para caracterizar o PDE, atuando na mesma profundidade daquela operação. Posteriormente, no verão de 2008/09, foi implantada a cultura do milho em todas as parcelas, cujo ciclo estendeu-se até fevereiro de 2009, quando realizou-se a colheita das espigas e as plantas remanescentes foram roçadas.

No dia 09 de fevereiro de 2009 foi realizada a semeadura do nabo forrageiro e do guandu anão, nas sub-parcelas correspondentes a estes tratamentos. A semeadura foi realizada com a utilização de saraquá.

(A)



(B)



Figura 2 – Parcelas com nabo forrageiro (A) e guandu anão (B) aos 60 dias após o plantio. Dois Vizinhos, PR, 2010.

As demais parcelas permaneceram em pousio durante o período de desenvolvimento das plantas de cobertura. No dia 30 de maio de 2009 realizou-se a coleta da parte aérea de plantas visando à determinação da produção total de matéria verde e seca, bem como, análise da composição nutricional das mesmas. Os resultados destas análises estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Produção de biomassa (matéria verde – MV, e matéria seca - MS) da parte aérea e composição nutricional (%) das espécies de plantas de cobertura de solo cultivadas no outono/inverno. Média de 9 repetições. UTFPR, Dois Vizinhos, 2010.

Espécie	M. V.	M.S.	N	P	K	Ca	Mg
	Mg.ha ⁻¹						
Nabo forrageiro	6.0	2.1	1,85	0,32	0,80	0,80	0,53
Guandu anão	10.2	3.0	2,36	0,44	0,76	0,56	0,44

O manejo das plantas de cobertura citadas anteriormente foi efetuado neste mesmo dia, utilizando um herbicida dessecante a base de glifosate na dose 3 L.ha⁻¹ do produto comercial Roundup Original®.

A semeadura do trigo, cultivar BRS 220, classe comercial trigo pão, foi realizada no dia 19 de junho de 2009, com espaçamento de 0,18 m nas entrelinhas e com densidade de 80 plantas por metro linear. As sementes receberam tratamento com fungicida a base de triadimenol e inseticida a base de imidacloprid. Utilizou-se adubação de base constituída de 400 kg.ha⁻¹ do formulado 08-20-20 (NPK). A adubação de cobertura foi de 100 kg.ha⁻¹ de uréia, aplicados no dia 31 de julho de 2009, durante o estágio de perfilhamento (Figura 2 - A).

O controle das plantas daninhas foi realizado com o herbicida contendo o princípio ativo metsulfuron metil, dose de 4 g.ha⁻¹. Realizou-se o controle fitossanitário com fungicida contendo o princípio ativo picoxystrobina + ciproconazol, na dose de 300 mL.ha⁻¹, durante o período de alongação (Figura 2 - B) e posteriormente no florescimento com fungicida tebuconazole na dose de 750 mL.ha⁻¹, contudo, tendo em vista as condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento de doenças, observou-se intensa severidade de mancha-da-gluma (*Stagonospora nodorum*).

(A)



(B)



Figura 3 – Vista parcial do experimento no estágio de perfilhamento (A) e alongação (B) do trigo. Dois Vizinhos, PR, 2010.

3.4 AVALIAÇÕES

3.4.1 Densidade e Porosidade do Solo

Em cada sub-parcela foram retiradas amostras com estrutura preservada, nas profundidades de: 0 a 0,05; 0,05 a 0,10; 0,10 a 0,15; 0,15 a 0,20; 0,20 a 0,25 m, em mini-trincheiras. Foram coletadas três amostras por profundidade, totalizando 9 amostras por tratamento. O cilindro volumétrico utilizado na coleta era de aço inoxidável com aproximadamente 85 cm³ de volume (6 cm de diâmetro por 3 cm de altura, aproximadamente). As amostras foram coletadas no dia 18 de junho de 2009.

A densidade do solo e a porosidade foram avaliadas segundo a metodologia descrita por EMBRAPA (1997), considerando-se como porosidade total o volume de água existente nas amostras saturadas e microporosidade (Pmi) do solo o espaço poroso ocupado por água após aplicação de sucção exercida por uma coluna de água de 60 cm de altura. Para essa determinação foi utilizada uma mesa de tensão. A macroporosidade (Pma) é obtida pela diferença entre a porosidade total (PT) e a microporosidade (Pmi).

3.4.2 Resistência a Penetração

Na mesma data da coleta das amostras de solo, mediu-se a resistência do solo à penetração até a profundidade de 0,25 m, com o uso de um penetrômetro eletrônico marca EIJKELKANP, com ponta (cone) de 1 cm² de área. As leituras foram registradas verticalmente a cada 0,01 m até a profundidade de 0,25 m. Foram feitas 5 repetições por tratamento. Os resultados da umidade gravimétrica do solo no momento das avaliações estão descritos nos APÊNDICES 1 e 2.

3.4.3 Produção da cultura teste

Para determinação da produção total de grãos, do número de plantas por m² e do número de espigas por m², coletaram-se todas as plantas de 4 m² de área útil de cada sub-parcela. As espigas foram debulhadas utilizando uma

trilhadora de cereais, determinando-se a massa de grãos e expressando-a em Mg.ha^{-1} , com umidade corrigida para 13 % quando necessário.

No momento da colheita dos grãos, coletou-se uma amostra constituída de 15 espigas por sub-parcela, a partir das quais se determinou os seguintes componentes do rendimento: massa da espiga, número de espiguetas/espiga, número de grãos/espiguetas, número de grãos/espiga e a massa seca de grãos por espiga. Por fim, determinou-se a massa de mil grãos e o peso do hectolitro com o uso de balança de peso específico.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO DADOS

A análise estatística dos dados foi realizada através do programa computacional Sanest (ZONTA; MACHADO; SILVEIRA, 1984), fazendo-se a análise de variância e teste F com 1% de probabilidade. Nos casos em que se encontrou variância significativa, a mesma foi complementada pelo teste de Tukey a 1%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DENSIDADE DO SOLO

A análise estatística dos dados de densidade do solo (Ds) (APENDICE 3) demonstrou que, em todas as profundidades avaliadas, não houve interação significativa entre os fatores, níveis de compactação e sistemas de manejo do solo. Tanto para a análise da variância, como para o teste de comparação de médias foi adotado o nível de significância de 1%. O teste F evidenciou variância significativa para o fator níveis de compactação para a profundidade 0,05 a 0,10 m, sendo as médias submetidas à aplicação do teste Tukey. Na Tabela 4 são apresentados os valores de Ds.

Na camada de 0,0 – 0,05 m de profundidade, os valores médios de densidade do solo para os níveis de compactação foram respectivamente de 1,07, 1,09 e 1,20 Mg.m⁻³, para PDE, PDC e PDA. A camada superficial é a que apresenta os menores valores de Ds no perfil do solo para os três níveis de compactação, comportamento este, previsível, visto que, durante o manejo anual por ocasião da implantação das culturas (normalmente duas) ocorre uma movimentação do solo com os sulcadores da semeadora, eliminando a compactação resultante do tráfego das máquinas agrícolas, conforme observou Marcolin (2009). Outro aspecto que possivelmente exerça influência e contribui para esta menor densidade, é a atividade biológica mais intensa nesta camada, bem como maiores teores de matéria orgânica que atuam melhorando a estrutura e conseqüentemente, reduzindo a Ds.

Genro Junior (2002), destaca que para culturas de inverno, considerando espaçamento médio de 0,17 m nas entrelinhas e a mobilização de uma faixa de 0,05 m pelos mecanismos sulcadores em profundidade onde são depositadas as sementes e adubo, resulta em cerca de 30 % de área mobilizada em uma única operação, partindo desta observação e considerando as culturas de verão, conclui-se que em pouco tempo toda a camada superficial é mobilizada. O que resulta em certa descompactação nesta camada, contribuindo para o estabelecimento de menores valores de densidade do solo.

Tabela 4 - Valores médios de densidade (Mg.m^{-3}) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação inicial, sistemas de manejo de recuperação do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

Níveis de compactação	Sistemas de manejo				Média
	PD + Escarif.	PD + Guandu	PD + Nabo	PD contínuo	
Profundidade 0,0 – 0,05 m					
PDE ³	1,07	1,06	1,02	1,14	1,07
PDC	1,05	1,08	1,03	1,21	1,09
PDA	1,20	1,14	1,21	1,24	1,20
Média	1,11¹	1,09	1,09	1,20	
CV (A)			0,8		
CV (B)			2,1		
Profundidade 0,05 - 0,10 m					
PDE	1,15	1,28	1,11	1,23	1,19 B²
PDC	1,27	1,32	1,30	1,38	1,32 AB
PDA	1,26	1,36	1,34	1,37	1,33 A
Média	1,23	1,32	1,25	1,33	
CV (A)			0,8		
CV (B)			2,1		
Profundidade 0,10 - 0,15 m					
PDE	1,29	1,17	1,31	1,29	1,25
PDC	1,24	1,40	1,42	1,36	1,36
PDA	1,21	1,37	1,40	1,36	1,34
Média	1,25	1,31	1,38	1,34	
CV (A)			0,8		
CV (B)			1,8		
Profundidade 0,15 - 0,20 m					
PDE	1,37	1,20	1,27	1,39	1,31
PDC	1,23	1,36	1,40	1,32	1,33
PDA	1,26	1,39	1,36	1,43	1,36
Média	1,29	1,32	1,34	1,38	
CV (A)			0,9		
CV (B)			1,6		
Profundidade 0,20 - 0,25 m					
PDE	1,30	1,24	1,28	1,30	1,27
PDC	1,30	1,30	1,24	1,30	1,29
PDA	1,22	1,32	1,28	1,33	1,29
Média	1,27	1,29	1,27	1,31	
CV (A)			0,8		
CV (B)			1,9		

¹Ausência de letras na linha indicam ausência de variância significativa entre sistemas de manejo pelo teste F a 1% de significância.

²Médias de tratamento seguidas de mesma letra maiúscula na coluna indicam ausência de diferenças significativas entre níveis de compactação pelo teste Tukey a 1% de significância.

³PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional

Na camada 0,05 – 0,10 m de profundidade, o nível de compactação caracterizado como PDE apresentou um valor de densidade do solo média de 1,19 Mg.m^{-3} , estatisticamente semelhante ao observado no PDC (1,32 Mg.m^{-3}), mas que é inferior ao observado no PDA (1,33 Mg.m^{-3}), evidenciando o efeito benéfico da

escarificação do solo realizada treze meses antes da realização das avaliações, corroborando os resultados obtidos por Klein e Camara (2007) que relatam efeito da escarificação na redução da Ds sob plantio direto, com diferenças evidenciadas seis meses após a operação.

Na camada de 0,10 – 0,15 m de profundidade ainda se observa uma tendência de menores valores de Ds no nível PDE, porém sem significância estatística ($p < 0,01$) como nas camadas subjacentes. Provavelmente isso ocorra porque, a durabilidade do efeito da escarificação esteja associada a atividade biológica e ao teor de matéria orgânica do solo, que nestas camadas sub-superficiais são menores do que nas camadas superficiais.

Na profundidade de 0,15 a 0,20 m encontra-se a camada de maior Ds para o PDE e PDA, indicando que o sistema de preparo anterior a adoção do SPD pode ter contribuído para a formação de uma camada compactada abaixo da profundidade de atuação do revolvimento mecânico dos implementos, além dos efeitos cumulativos das pressões aplicadas sobre o solo, o que pode ser constatado pelos valores elevados de resistência a penetração que serão apresentados a seguir para estas mesmas profundidades. Stone e Silveira (2001), ao estudar o efeito de diferentes sistemas de preparo do solo sobre a porosidade e a densidade do solo, identificaram influência do preparo com grade até os 0,15 m e do arado até os 0,30 m, reduzindo a densidade e elevando a porosidade. Tradicionalmente, eram estes os implementos utilizados nas operações de preparo na região de realização do presente estudo. Segundo Reichert et al. (2007), nos sistemas onde há revolvimento do solo a camada compactada é rompida pelos implementos, transferindo a compactação para maiores profundidades pelo tráfego e contato dos implementos com o solo sub-superficial. Esta camada ficou conhecida pelo termo “pé-de-grade” ou “pé-de-arado”, localizando-se em uma faixa que, na maioria dos casos ocorre entre 0,1 a 0,2 m de profundidade (GIRARDELLO, 2010).

A densidade do solo refletiu o efeito da aplicação de pressões, onde, para o PDC e PDA, exceto na camada superficial (0,0 – 0,05 m), os valores observados superam o intervalo proposto por Reichert et al. (2003), de 1,25 a 1,30 Mg.m^{-3} , estabelecido a partir do indicador de qualidade estrutural do solo IHO para solos argilosos, onde poderá ocorrer influência negativa sobre o rendimento de plantas. Nos tratamentos que receberam a escarificação, mesmo que as diferenças em relação ao PDC e PDA, não terem sido suficientes para evidenciar diferenças

estatísticas significativas, observa-se que a operação de escarificação foi capaz de interferir no decréscimo da densidade do solo, que se manteve inferior a $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ até a profundidade de 0,25 m.

Para os sistemas de manejo de recuperação de solo, a densidade do solo foi menor nas parcelas onde foi realizada a escarificação, mas não diferiu significativamente do plantio direto contínuo. Do mesmo modo, não foi possível estabelecer efeito positivo do cultivo de guandu anão e de nabo forrageiro no período de outono sobre a redução da densidade do solo, resultados estes discordantes do que observou Reinert et al. (2008), que verificaram menor densidade na camada superficial em Argissolo Vermelho distrófico típico em resposta a utilização de plantas de cobertura. Os autores observaram que a utilização de guandu proporcionou os melhores índices de redução de densidade do solo. Debiasi et al. (2008), encontraram efeito das plantas de cobertura de inverno, como nabo e aveia preta, sobre a redução da D_s e aumento da porosidade total e macroporosidade em comparação ao pousio, em um Argissolo Vermelho distrófico típico, de textura superficial franco-argilo-arenosa.

É importante salientar a baixa produção de matéria seca do guandu anão e do nabo forrageiro no presente experimento, 3 e 2 Mg.ha^{-1} respectivamente, quando comparadas ao observado por outros autores que obtiveram produções de matéria seca que superaram 6 Mg.ha^{-1} para o nabo forrageiro (DONEDA, 2010) e 12 Mg.ha^{-1} para o guandu anão (BORDIN et al., 2008), visto que, o ciclo de crescimento e permanência destas plantas foi curto, o que pode ter contribuído para a menor efetividade dos resultados aqui relatados.

4.2 POROSIDADE TOTAL

Na comparação das médias da propriedade porosidade total do solo (PT) (Tabela 5), não verifica-se ocorrência de interação ($p < 0,01$), entre os fatores níveis de compactação e sistemas de manejo, havendo efeito do fator sistemas de manejo de forma isolada na profundidade 0,05 – 0,10 m (APÊNDICE 3), sendo as médias comparadas através do teste de Tukey a 1% de significância.

Tabela 5 - Valores médios de porosidade total (%) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

Níveis de compactação	Sistemas de manejo				Média
	PD + Escarif.	PD + Guandu	PD + Nabo	PD contínuo	
Profundidade 0,0 – 0,05 m					
PDE ³	70,5	72,1	70,4	67,9	70,2²
PDC	70,9	70,9	66,7	68,2	69,2
PDA	67,2	65,1	61,9	64,8	64,7
Média	69,5	69,4	66,3	66,9	
CV (A)			1,5		
CV (B)			4,6		
Profundidade 0,05 - 0,10 m					
PDE	66,5	63,6	69,9	62,4	65,6
PDC	64,9	60,7	61,3	59,0	61,5
PDA	63,6	59,3	59,3	59,5	60,4
Média	65,0 a¹	61,2 b	63,5 ab	60,3 b	
CV (A)			2,5		
CV (B)			2,7		
Profundidade 0,10 - 0,15 m					
PDE	62,4	69,2	64,3	65,3	65,3
PDC	59,6	59,5	59,7	59,0	59,5
PDA	65,4	56,2	57,5	57,0	59,0
Média	62,5	61,6	60,5	60,4	
CV (A)			2,5		
CV (B)			3,7		
Profundidade 0,15 – 0,20 m					
PDE	61,3	61,1	62,2	64,5	60,3
PDC	64,2	58,6	57,8	59,5	62,3
PDA	61,4	55,3	58,2	59,8	58,7
Média	62,3	58,3	59,4	61,3	
CV (A)			2,3		
CV (B)			5,2		
Profundidade 0,20 – 0,25 m					
PDE	63,3	62,7	62,5	63,0	62,9
PDC	61,1	62,1	61,3	60,1	61,2
PDA	65,2	61,1	61,2	59,7	61,8
Média	63,2	61,9	61,7	60,9	
CV (A)			1,7		
CV (B)			5,2		

¹ Médias seguidas de mesma letra na linha indicam ausência de diferença significativa entre sistemas de manejo pelo teste Tukey a 1% de significância.

² Ausência de letras na coluna indicam ausência de variância significativa entre níveis de compactação pelo teste F a 1% de significância.

³ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional.

Até a profundidade de 0,15 m, o nível PDE apresentou maior porosidade total que o PDC e PDA, porém as diferenças não foram suficientes para que aparecessem diferenças significativas avaliadas a 1% de probabilidade. Esta tendência está em conformidade com resultados obtidos por Tormena et al. (2004), que observaram que o sistema de preparo com escarificação promoveu aumento da

porosidade do solo, quando comparados ao plantio direto. Nas camadas mais profundas não se observaram variações significativas.

Na camada superficial, 0,0 - 0,05 m, os valores de porosidade total (Tabela 5) em todos os estados de compactação, são numericamente mais altos, possivelmente em função do teor mais elevado de matéria orgânica e do revolvimento ocasionado pelo mecanismo sulcador da semeadora como já discutido anteriormente.

Na camada de 0,05 – 0,10 m, os sistemas de manejo se diferenciaram quanto à porosidade total. A escarificação aumentou a PT nesta profundidade e diferiu estatisticamente dos tratamentos plantio direto com inclusão de guandu anão e plantio direto contínuo.

No tratamento com plantio direto com compactação adicional (PDA), a PT não diferiu estatisticamente, apesar de ser mais baixa do que o tratamento com escarificação (PDE), e isso se deve, possivelmente ao tempo decorrido entre a realização da operação de escarificação e as avaliações contribuindo para diminuir as diferenças entre os tratamentos, conforme observado por Girardello (2010), que constatou que o efeito da escarificação mecânica desapareceu no decorrer de 7 meses, devido ao reagrupamento das partículas de solo, efeito este evidenciado pela avaliação da infiltração de água no solo, propriedade esta, que reflete a condição porosa do solo.

Na profundidade de 0,15 - 0,20 m foram encontrados os menores valores de PT para o PDE e PDA, enquanto que para o PDC este comportamento se manifestou na profundidade de 0,10 - 0,15 m, coincidindo com a camada compactada baseando-se nos valores de Ds.

4.3 MACROPOROSIDADE

Os valores de macroporosidade não apresentaram variância significativa estatisticamente em função dos níveis de compactação, sistemas de manejo ou da interação entre estes fatores, conforme resultados da ANOVA (APÊNDICE 3). Entretanto, se observou tendência da escarificação realizada nas parcelas principais e nas subparcelas refletir em maior macroporosidade em todas as camadas avaliadas (Tabela 6).

Pode se observar que, no tratamento com compactação adicional (PDA), a macroporosidade foi menor nas camadas superficiais. Um dos primeiros indicativos da ocorrência do processo de compactação é a redução do tamanho dos poros, haja vista que a macroporosidade se forma, principalmente, a partir do estabelecimento de espaços entre as unidades estruturais do solo (agregados). Chaney et al. (1985), observaram que em solos sob sistemas de cultivo sem revolvimento se estabelece uma estrutura que diferencia-se daquela de solos não cultivados, por apresentar agregados mais densos e resistentes e que estão mais próximos entre si, ou seja, com menos macroporos.

Se observou, ainda, tendência de decréscimo nos valores de macroporos no PDE com o aumento da profundidade do solo. O mesmo comportamento ocorreu para o sistema de manejo com escarificação. Este fato evidencia o efeito mais pronunciado da atuação do escarificador até os 0,15 m de profundidade, sendo pouco eficiente em criar macroporos em camadas mais profundas.

Provavelmente isso ocorra, devido ao fato de a formação de poros de maior diâmetro estar relacionada à atividade biológica, que é menor nestes locais, e assim, os resultados da operação meramente mecânica são menos pronunciados. Exemplo disso é reportado por Nicoloso et al. (2008), que observaram influência do nabo forrageiro em aumentar a macroporosidade, além de potencializar o efeito da escarificação evitando a reconsolidação do solo, ao passo que o escarificador isoladamente, apresentou aumento da macroporosidade somente na camada de 0,0 - 0,05 m. Contrariamente Bordin et al. (2008), observaram que a escarificação elevou a macroporosidade em pomar cítrico até a profundidade de 0,3 m.

As necessidades das plantas quanto à porosidade de aeração variam com a espécie vegetal, exceto para o tratamento com guandu anão no nível de compactação PDA para a profundidade de 0,15 – 0,20 m, em todas as demais parcelas experimentais a macroporosidade situou-se acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 6), recomendado por Klein (2008), como sendo a mínima porosidade livre de água, ou seja, porosidade de aeração, para que não ocorram restrições ao pleno radicular e à difusão de gases.

Tabela 6 - Valores médios de macroporosidade (%) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

Níveis de compactação	Sistemas de manejo				Média
	PD + Escarif.	PD + Guandu	PD + Nabo	PD contínuo	
Profundidade 0,0 – 0,05 m					
PDE ³	31,8	30,2	33,5	28,3	30,9²
PDC	32,2	33,2	33,3	22,4	30,2
PDA	24,1	23,4	17,8	19,3	21,1
Média	29,4¹	28,9	28,2	23,3	
CV (A)			6,9		
CV (B)			9,0		
Profundidade 0,05 - 0,10 m					
PDE	26,0	16,5	29,3	22,0	23,5
PDC	20,5	17,8	17,8	19,1	21,3
PDA	18,8	15,3	14,7	15,0	15,9
Média	21,7	16,5	20,6	18,7	
CV (A)			9,2		
CV (B)			15,0		
Profundidade 0,10 - 0,15 m					
PDE	17,8	27,3	20,3	19,9	21,3
PDC	16,3	13,2	14,5	11,3	13,8
PDA	24,9	11,8	12,7	12,7	15,5
Média	19,6	17,4	15,8	14,6	
CV (A)			11,2		
CV (B)			13,4		
Profundidade 0,15 - 0,20 m					
PDE	15,8	19,8	18,5	19,8	18,4
PDC	16,3	10,8	11,3	14,7	13,2
PDA	19,3	9,8	13,4	12,9	13,7
Média	17,1	13,1	14,3	15,7	
CV (A)			5,8		
CV (B)			16,2		
Profundidade 0,20 - 0,25 m					
PDE	15,6	17,8	18,4	15,0	16,7
PDC	14,7	13,7	14,8	13,3	14,1
PDA	20,7	12,7	12,2	13,1	14,6
Média	17,0	14,7	15,1	13,8	
CV (A)			9,3		
CV (B)			14,6		

¹ Ausência de letras na linha indicam ausência de variância significativa entre sistemas de manejo pelo teste F a 1% de significância.

² Ausência de letras na coluna indicam ausência de variância significativa entre níveis de compactação pelo teste F a 1% de significância.

³ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional.

Conforme fora observado por Spera et al. (2009), apesar de não serem valores abaixo dos limites críticos, o estabelecimento desta condição, pode assumir relevante importância no tocante a infiltração de água no solo, visto que, este fenômeno no solo está condicionado a existência de uma rede de macroporos contínuos em profundidade, contribuindo fundamentalmente para um maior

armazenamento de água em camadas mais profundas do perfil do solo, com implicações positivas sobre a redução do escoamento superficial e maior disponibilidade de água às plantas.

4.4 MICROPOROSIDADE

Para microporosidade, não houve interação entre sistemas de manejo e níveis de compactação, tampouco diferenças significativas entre os tratamentos isoladamente em nenhuma das profundidades estudadas, conforme resultados da ANOVA apresentados no APENDICE 3.

Houve, de maneira geral, tendência de aumento na microporosidade com o aumento da profundidade nos três níveis de compactação (Tabela 7), tendendo a ser maior no tratamento com compactação adicional somente para a camada de 0,0 - 0,05 m em relação aos outros tratamentos. Coerente com a maior macroporosidade nesta profundidade, que demonstrou ser a classe de poros mais influenciada pelos níveis de compactação, tendo em vista, que a porosidade total decresceu com a profundidade. Concordando com as observações deste experimento, Suzuki (2005), em Latossolo Vermelho distrófico típico, verificou que alterações na densidade do solo levaram a modificações apenas na porosidade total e macroporosidade, enquanto a microporosidade não foi alterada.

De modo similar, Denardin et al. (2009), em trabalho que visava demonstrar a heterogeneidade física de um Latossolo Vermelho aluminoférrico húmico manejado sob sistema plantio direto, encontraram valores de porosidade total e de macroporosidade do solo, significativamente menores, porém não detectaram diferença significativa para a microporosidade do solo, possivelmente, por esta propriedade ser fortemente influenciada pela granulometria e em menor magnitude pela elevação da densidade do solo

Tabela 7- Valores médios de microporos (%) de um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

Níveis de compactação	Sistemas de manejo				Média
	PD + Escarif.	PD + Guandu	PD + Nabo	PD contínuo	
Profundidade 0,0 – 0,05 m					
PDE ³	38,6	41,8	36,9	39,6	39,3²
PDC	39,1	37,7	36,6	45,7	39,8
PDA	43,1	41,6	44,1	45,5	43,6
Média	40,3¹	40,4	39,2	43,6	
CV (A)			3,5		
CV (B)			4,5		
Profundidade 0,05 - 0,10 m					
PDE	40,4	47,0	40,4	40,4	42,1
PDC	44,4	42,8	43,4	43,9	43,7
PDA	44,9	44,0	44,5	44,5	44,5
Média	43,2	44,6	42,8	42,9	
CV (A)			5,7		
CV (B)			17,8		
Profundidade 0,10 - 0,15 m					
PDE	44,2	41,8	43,9	45,3	43,8
PDC	43,4	46,3	45,7	47,7	45,8
PDA	40,5	44,3	44,8	44,3	43,5
Média	42,7	44,2	44,8	45,8	
CV (A)			2,7		
CV (B)			3,6		
Profundidade 0,15 - 0,20 m					
PDE	45,4	41,2	43,5	44,4	43,6
PDC	47,7	47,7	46,3	44,5	46,5
PDA	41,9	45,3	44,5	46,7	44,6
Média	45,0	44,7	44,8	45,2	
CV (A)			1,4		
CV (B)			3,6		
Profundidade 0,20 - 0,25 m					
PDE	47,6	44,8	44,1	47,9	46,1
PDC	46,5	48,3	46,5	46,8	47,0
PDA	44,4	48,3	48,9	46,6	47,1
Média	46,1	47,2	46,5	47,1	
CV (A)			2,5		
CV (B)			3,4		

¹ Ausência de letras na linha indicam ausência de variância significativa entre sistemas de manejo pelo teste F a 1% de significância.

² Ausência de letras na coluna indicam ausência de variância significativa entre níveis de compactação pelo teste F a 1% de significância.

³ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional

4.5 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

A análise de variância (APÊNDICE 3) mostra que houve variação significativa ($p < 0,01$) pelo Teste F para sistemas de manejo na camada de 0,10 - 0,15 m, e ausência de significância para níveis de compactação, sistemas de manejo e para a interação destes dois fatores nas demais profundidades estudadas.

Os resultados da resistência mecânica do solo à penetração (R_p) nos diferentes níveis de compactação e sistemas de manejo estudados são apresentados nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

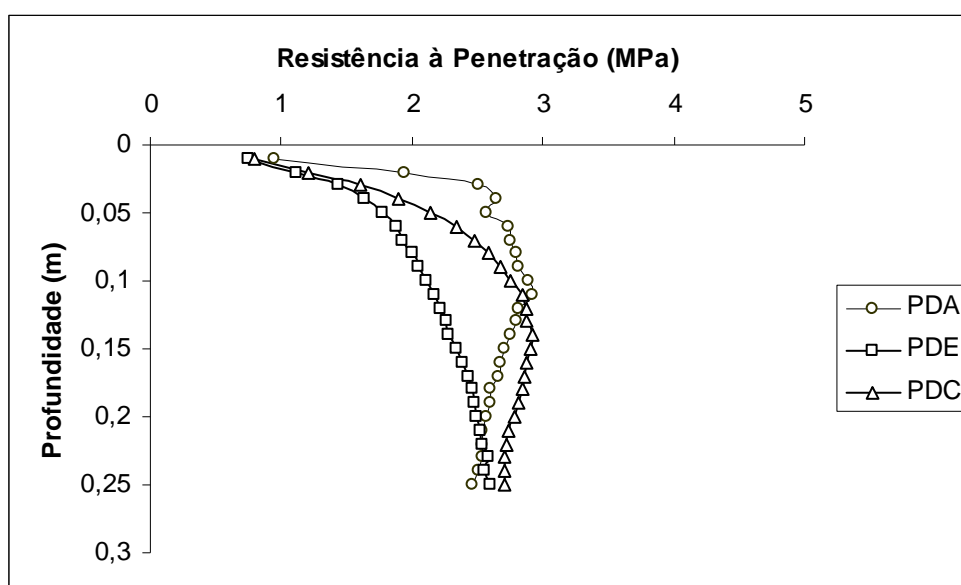


Figura 4 - Valores médios de Resistência à Penetração (MPa) de um NITOSSOLO VERMELHO em função dos níveis de compactação inicial do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional.

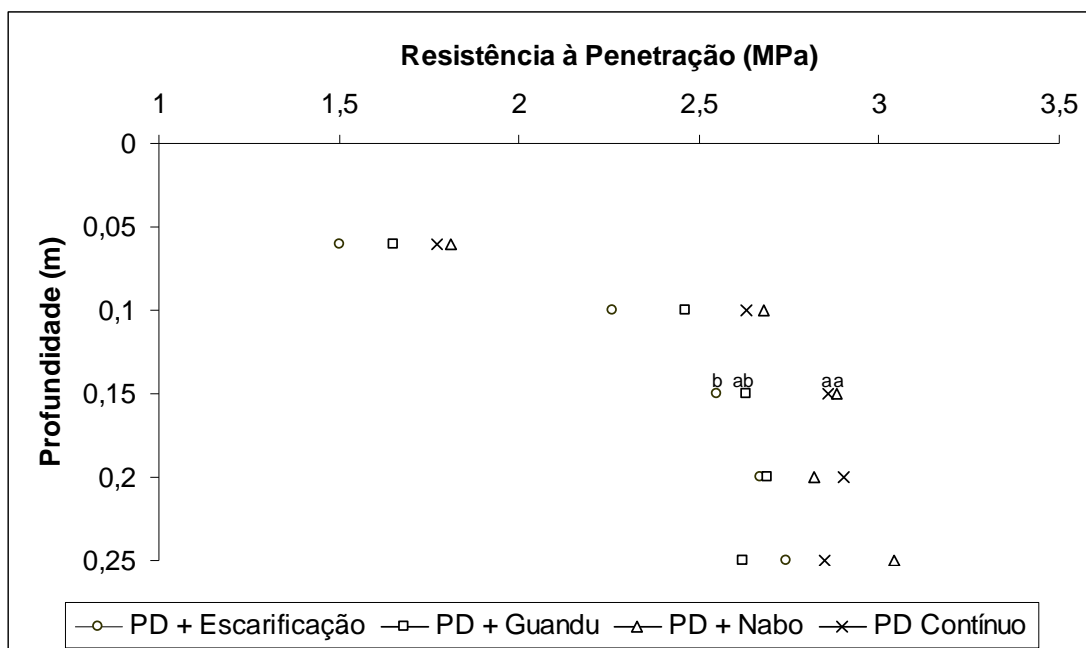


Figura 5 - Valores médios de Resistência à Penetração (MPa) de um NITOSSOLO VERMELHO em função dos sistemas de manejo de recuperação do solo em diferentes profundidades. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

¹ Médias seguidas de mesma letra na linha indicam ausência de diferença significativa entre sistemas de manejo pelo teste Tukey a 1% de significância.

Na profundidade de 0,10 – 0,15 m, a RP variou de 2,55 a 2,88 MPa entre os sistemas de manejo de recuperação do solo, onde o menor valor de Rp observado foi no tratamento que recebeu a escarificação, que diferenciou-se estatisticamente dos sistemas de manejo, plantio direto com inclusão de nabo e plantio direto contínuo (Figura 5), demonstrando que a escarificação foi eficiente em reduzir a Rp.

A Rp no nível de compactação PDE até os 0,10 m de profundidade apresentou valores que indicam a ausência de problemas para o bom desenvolvimento radicular da planta, situando-se abaixo de 2 MPa (Figura 4). Possivelmente, está foi a profundidade de atuação do implemento, e a maior resistência na profundidade de 0,20 - 0,25 m, evidencia a faixa na qual a haste do escarificador não conseguiu romper. Em um Latossolo Vermelho, Collares et al. (2008) observaram que a compactação causada por uma passada de uma máquina com massa total de 16,6 Mg apresentou um aumento significativo na RP até a profundidade de 0,12 m, enquanto que nos tratamentos onde realizou-se a escarificação, esta demonstrou ser eficiente na diminuição da RP até os 0,25 m,

mantendo os valores sempre abaixo de 2 MPa, não estando em conformidade com o presente trabalho, em que, a RP apresentou comportamento crescente no tratamento escarificado, atingindo valor máximo na profundidade de 0,25 m.

No PDC e PDA, a partir dos 0,05 m, os valores de RP observados, sugerem, para plantas sensíveis a valores de RP iguais ou maiores que 2 MPa, um decréscimo na produção vegetal. Porém, este parâmetro que reflete a condição física do solo, quando utilizado isoladamente, é limitado, com vistas a atender critérios de produção.

Considerando que essa camada de maior resistência não é uniforme, conforme constatou Suzuki (2005), pra quem no campo a camada compactada não se apresenta como uma massa contínua, há espaços de maior e menor resistência e as raízes procuram os espaços livres no solo para se desenvolver. Silva (2003) complementa salientando que o método de medição da RP não é capaz de identificar e integrar o efeito de rachaduras e de poros biológicos existentes no solo e é por essas regiões de menor resistência que as raízes conseguem se desenvolver, mesmo em solos com alta RP.

Os valores mais elevados da resistência mecânica à penetração ao longo do perfil do solo, observados nesses tratamentos, com mais evidência no PDA, podem ser devidos à tendência de degradação da estrutura ao longo do perfil do solo provocado pelo uso intensivo da mecanização agrícola adotada no sistema convencional, anterior a adoção do sistema de plantio direto, caracterizando compactação do solo, em função de operações como a aração (em geral realizada a 0,20 m de profundidade) e às gradagens.

Verifica-se que a maior RP foi encontrada na profundidade de 0,20-0,25 m, no PDE e PDA. De maneira geral, estes resultados são coincidentes com os obtidos por Pedrotti (2001), onde os diferentes sistemas de cultivo influenciaram a resistência mecânica do solo à penetração de forma mais acentuada, na camada de aproximadamente 0,08 a 0,20 m passando, por exemplo, de valores de 1,7 MPa a 0,06 m de profundidade para valores de 4,5 MPa a 0,13 m de profundidade.

4.6 COMPONENTES DE RENDIMENTO

Na tabela 8, encontram-se as médias para número de plantas por m², número de espigas por planta, peso de espigas, número de grãos por espiga,

espiguetas por espiga e de grãos por espiguetas para cada um dos tratamentos estudados. A ANOVA (APÊNDICE 4) revelou variância significativa a 1 % de probabilidade para interação entre os níveis de compactação e sistemas de manejo de recuperação do solo, para o componente de rendimento número de grãos por espiguetas, sendo as médias submetidas ao teste Tukey. Para as demais variáveis estudadas não verificou-se influência dos níveis de compactação, sistemas de manejo e interação entre os dois fatores.

O número de grãos por espiguetas foi influenciado pela interação entre os níveis de compactação e os sistemas de manejo de recuperação do solo. No PDA a escarificação realizada cerca de 10 meses anteriormente ao cultivo do trigo, promoveu maior número de grãos por espiguetas, diferindo do PDC e do PDE pelo teste de Tukey a 1%, corroborando os resultados obtidos por Klein et al. (2008), que observaram efeito da escarificação sobre este componente de rendimento do trigo, além do número de espiguetas por espiga e o peso hectolitro, que foram significativamente maiores em relação ao plantio direto, sendo o resultado atribuído as alterações positivas nas propriedades físicas do solo provocadas pela operação da escarificação.

Entre os sistemas de manejo, a escarificação apresentou maior número médio de grãos por espiguetas (2,25), sendo superior ao plantio direto cultivado com guandu anão no outono e o plantio direto contínuo, com 1,82 e 1,85, mas foi igual ao plantio direto cultivado com nabo forrageiro no outono com número médio de 2 grãos por espiguetas.

O tratamento plantio direto com nabo forrageiro também foi responsável por elevar de maneira significativa o número de grãos por espiguetas no nível de compactação PDE em relação ao PDC e PDA. Este comportamento pode estar relacionado à maior mineralização de nitrogênio neste tratamento, pela inclusão do nabo no sistema de cultivo, otimizada pela escarificação.

A diferenciação deste componente do rendimento promovida pela escarificação, possivelmente esteja relacionado às melhores condições físicas do solo no momento da fertilização, fase fenológica na qual o número de grãos por espiguetas é determinado, exercendo grande importância para compor o rendimento final de grãos, pois quanto maior o número de grãos, maior será o número de drenos, e portanto a competição por assimilados fotossintéticos é favorecida para os

grãos em detrimento dos outros órgãos e tecidos da planta e o índice de colheita aumenta.

O motivo pelo qual esta tendência não foi comprovada, possivelmente esteja relacionada aos elevados índices pluviométricos observados durante o período de condução do experimento (Figura 1), que provavelmente amenizaram os reflexos da compactação do solo sobre as demais variáveis analisadas, que são determinadas em períodos distintos do ciclo de desenvolvimento da planta, mas principalmente, esta condição de clima afetou negativamente a qualidade industrial dos grãos, o que fica explícito pela análise da variável de PH que será discutida mais adiante. Neste período, a precipitação acumulada durante os meses de junho a outubro foi de 1044 mm, período no qual a cultura esteve no campo, correspondendo a 22 % superior aos valores históricos observados no município de Dois Vizinhos, 809 mm, na média dos anos 1973–2006 (POSSENTI et al., 2007).

O número de plantas/m² e o número de espigas/m² não diferiu estatisticamente entre os níveis de compactação. Embora não significativo, os níveis de compactação PDE e PDC apresentaram maiores valores numéricos para estas variáveis.

Foi possível verificar ainda, porém de maneira menos expressiva, a influência da escarificação sobre as variáveis número de espiguetas e número de grãos por espiga, evidenciado pela variância significativa a 5%. O número de grãos por espiga foi de 30,4 para o PDE e 26,4 e 27,8, respectivamente no PDC e PDA. Estes resultados estão de acordo com Camara e Klein (2005) que observaram que os componentes de rendimento da soja e a altura das plantas avaliadas não apresentaram diferença significativa do tratamento escarificado em relação ao plantio direto, indicando um desenvolvimento muito similar das plantas da soja em condições de solo distintas.

Tabela 8 - Médias das variáveis que compõe o rendimento de trigo cultivado em um Nitossolo Vermelho em função do nível de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

Níveis de compactação	Sistemas de manejo				Média
	PD + Escarif.	PD + Guandu	PD + Nabo	PD contínuo	
Número de Planta/m²					
PDE ³	186,2	214,5	184,2	218,3	200,8²
PDC	197,3	208,7	221,3	239,5	216,7
PDA	194,4	165,3	202,1	144,5	176,6
Média	192,6¹	196,2	202,4	200,8	
CV (A)			9,2		
CV (B)			9,0		
Número de espigas/m²					
PDE	146,8	170,7	150,9	156,0	156,1
PDC	160,4	176,6	163,1	187,5	171,9
PDA	137,0	129,0	172,3	129,0	141,8
Média	148,1	158,8	162,1	157,5	
CV (A)			9,3		
CV (B)			9,8		
Peso de espiga (g)					
PDE	1,22	1,18	1,44	1,42	1,31
PDC	1,18	1,13	1,20	0,94	1,11
PDA	1,44	1,17	1,21	1,20	1,26
Média	1,28	1,16	1,28	1,19	
CV (A)			2,4		
CV (B)			3,2		
Número de grãos/espiga					
PDE	30,1	27,8	33,2	30,3	30,4
PDC	28,1	27,3	25,6	24,6	26,4
PDA	30,5	26,9	28,7	25,3	27,8
Média	29,6	27,3	29,2	26,7	
CV (A)			2,0		
CV (B)			5,8		
Número de espiguetas/espiga					
PDE	15,7	16,3	16,3	15,6	15,9
PDC	14,7	15,9	15,9	14,1	15,1
PDA	14,4	14,7	14,3	16,0	14,9
Média	14,9	15,6	15,5	15,2	
CV (A)			1,0		
CV (B)			3,0		
Número de grãos/espiguetas					
PDE	1,92 bA ⁴	1,70 aAB	2,03 bB	2,03 aAB	1,92
PDC	1,91 bA	1,71 aAB	1,60 aA	1,84 aAB	1,77
PDA	2,25 aA	1,82 aB	2,00 aAB	1,85 aB	1,98
Média	2,03	1,74	1,87	1,90	
CV (A)			1,9		
CV (B)			2,1		

¹ Ausência de letras na linha indicam ausência de variância significativa entre sistemas de manejo pelo teste F a 1% de significância.

² Ausência de letras na coluna indicam ausência de variância significativa entre níveis de compactação pelo teste F a 1% de significância.

³ Médias seguidas de mesma letra minúsculas na coluna e maiúsculas na linha indicam ausência de variância significativa para a interação entre níveis de compactação e sistemas de manejo pelo teste Tukey a 1% de significância.

⁴ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional

4.7 RENDIMENTO DE GRÃOS

Com relação ao rendimento de grãos não houve interação significativa entre os tratamentos, sistemas de manejo do solo e estados de compactação (APÊNDICE 4). Dessa forma não foi possível com estes resultados, indicar efeito positivo das plantas de cobertura e da escarificação impondo condições que diferenciasssem o rendimento de grãos da cultura do trigo.

O maior rendimento de trigo foi obtido no tratamento PDE, $1,93 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, que não diferiu estatisticamente de PDC, $1,87 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e SPD compactado $1,75 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Tabela 9). Embora se perceba uma tendência de incremento da produtividade, cerca de 6% superior, do nível de compactação que apresentou melhores indicadores físicos (PDE) para o de menor qualidade física (PDA), a exemplo do que observaram Klein et al. (2008), que obtiveram incrementos de rendimento de grãos de trigo de $0,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ em função das condições físicas do solo obtidas mediante escarificação em relação ao plantio direto.

Isso demonstra que o estado estrutural não comprometeu a produtividade, ou as modificações ocorridas nos atributos físicos avaliados não foram afetadas de forma suficiente para interferir na produtividade do trigo, frente as condições climáticas vigentes durante o desenvolvimento do presente estudo, não permitindo a manifestação destes efeitos. Os resultados concordam com Kochhann et al. (1999), que constataram que a aparente degradação estrutural do solo, indicada pelas análises de densidade do solo e porosidade, não implicou efeitos negativos sobre o rendimento das cultura do trigo. Collares et al. (2008), também não constataram efeito da escarificação sobre o rendimento de grãos de trigo, mesmo quando à resistência a penetração atingiu valores críticos em plantio direto.

É possível que a ausência de resposta significativa na produção de grãos de trigo, em função dos diferentes níveis de compactação e sistemas de manejo testados no experimento, esteja relacionada à elevada taxa de precipitação pluvial observada durante o período do experimento, o que pode ter contribuído para uma alta disponibilidade de água no solo durante todo período de desenvolvimento da cultura.

Tabela 9 – Rendimento de grãos, peso de mil grãos e peso hectolitro de trigo cultivado em um Nitossolo Vermelho sob diferentes níveis de compactação inicial e sistemas de manejo de recuperação do solo. UTFPR, Dois Vizinhos, PR, 2010.

Níveis de compactação	Sistemas de manejo				Média
	PD + Escarif.	PD + Guandu	PD + Nabo	PD contínuo	
Rendimento de grãos Mg.ha⁻¹					
PDE ³	1,83	1,82	1,88	2,24	1,94²
PDC	1,72	2,05	1,90	1,85	1,87
PDA	2,03	1,49	2,07	1,75	1,83
Média	1,86¹	1,79	1,94	1,94	
CV (A)			8,6		
CV (B)			5,8		
Peso de mil grãos (g)					
PDE	29,5	31,0	40,4	32,2	33,3
PDC	26,6	30,8	30,7	30,7	29,7
PDA	34,8	32,4	32,3	33,1	33,1
Média	30,3	31,4	34,5	32,0	
CV (A)			2,6		
CV (B)			6,7		
Peso Hectolitro (kg.hL⁻¹)					
PDE	68,8	68,7	70,3	69,0	69,2
PDC	67,3	67,9	69,4	68,1	68,2
PDA	68,6	68,1	67,9	66,1	67,7
Média	68,2	68,2	69,2	67,7	
CV (A)			0,7		
CV (B)			1,1		

¹ Ausência de letras na linha indicam ausência de variância significativa entre sistemas de manejo pelo teste F a 1% de significância.

² Ausência de letras na coluna indicam ausência de variância significativa entre níveis de compactação pelo teste F a 1% de significância.

³ PDE = Plantio Direto escarificado; PDC = Plantio direto contínuo; PDA = Plantio Direto com compactação adicional

Neste período a precipitação acumulada durante o ciclo do trigo foi substancialmente superior aos valores históricos e, desta maneira, se supõe que mesmo que a capacidade do solo armazenar e disponibilizar água as plantas tenham sido afetadas pela compactação, o suprimento regular pelas chuvas supriu a demanda das plantas. Resultados como estes são descritos por Suzuki (2005) que não observou efeito significativo da compactação causada por diferentes níveis de compactação e sucessão de culturas, no rendimento de trigo, talvez pelo fato da água no solo não ter sido um fator limitante.

Por outro lado, deve-se considerar que os altos índices pluviométricos observados, especialmente nos meses de agosto, setembro e outubro de 2009 (Figura 1), foram determinantes para a observação de alta incidência de doenças foliares e da espiga, a despeito da aplicação de fungicidas, que resultaram em rendimentos baixos, de maneira que a produtividade média observada no

experimento (1.88 Mg.ha^{-1}) situa-se pouco abaixo da média para o estado do Paraná em 2009, que foi de 1.92 Mg.ha^{-1} (HUBNER, 2009). Segundo o autor, as perdas de produtividade na lavoura de trigo paranaense, provocadas pelo excesso de chuvas na fase final da cultura, chegaram a 29,8 % na média estadual e a 24,3 % na região de Dois Vizinhos.

O peso do hectolitro variou entre 67,7 e 69,2 kg.hL^{-1} entre os níveis de compactação, e de 67,9 e 69,2 kg.hL^{-1} entre os sistemas de manejo (Tabela 9), não havendo variância significativa entre os tratamentos. Estes valores de PH estão abaixo da classificação recomendada. Segundo Guarienti et al., (2000), a diminuição do peso hectolitro pode ser atribuída às mudanças sucessivas de umidade dos grãos, ciclos de secagem e umedecimento, além de prejuízos sobre o enchimento de grãos, resultante da redução de acúmulo de matéria seca, o que contribui para explicar os resultados deste trabalho.

A ocorrência de correlações negativas entre elevada umidade relativa do ar e excesso hídrico do solo sobre o peso de mil grãos, peso hectolitro e rendimento de grãos durante os períodos que antecedem a colheita, foi observada e é melhor explicada por Guarienti et al., (2005), sob condições de elevada umidade relativa o processo transpiratório de uma planta túrgida é mínimo, não ocorrendo fluxo de água na mesma, conseqüentemente de nutrientes. Tal condição, resulta em redução dos produtos fotossintéticos como, carboidratos, lipídios, aminoácidos, responsáveis pelo enchimento de grãos, de forma que, os grãos se tornam menores, influenciando nas variáveis peso de mil grãos e peso hectolitro, determinantes do rendimento de grãos.

5 CONCLUSÕES

1. A utilização de um cultivo de guandu anão e nabo forrageiro no outono, antecedendo a cultura do trigo, como medida de remediação biológica da compactação do solo, de maneira geral não produziu benefícios aparentes às propriedades físicas do solo;

2. A utilização de uma escarificação, antecedendo a cultura de verão, como medida de remediação mecânica da compactação do solo, de maneira geral não resultou em benefícios às propriedades físicas do solo avaliadas durante o cultivo de inverno;

3. Os sistemas de remediação da compactação, biológicos e mecânico, influenciaram o número de grãos por espigeta do trigo, mas não influenciaram os demais componentes do rendimento;

4. A produtividade do trigo não foi sensível às variações de resistência à penetração, densidade e porosidade do solo características dos diferentes níveis de compactação do solo ou daquelas resultantes do emprego de sistemas de remediação biológica e mecânica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alterações nas propriedades físicas do solo podem ser utilizadas para indicar a presença de ambientes distintos do solo com relação à compactação. No entanto, mesmo que estas alterações levem a observação de valores considerados restritivos, não necessariamente serão observadas alterações dos componentes que determinam o rendimento potencial em trigo, significando dizer que as alterações nas propriedades físicas do solo são somente indicadoras da ocorrência de compactação no solo estudado.

A existência de compactação pode não ser sinônima de baixos rendimentos das plantas, porque, dependendo das condições climáticas, mesmo que, indicadores da compactação estejam acima (densidade do solo e resistência a penetração) ou abaixo (porosidade de aeração) do seu valor crítico, poderão haver fluxos de água, ar, nutrientes e calor suficientes para atender as demandas das plantas.

Melhorias do ambiente edáfico, obtidas mediante, o uso de plantas de cobertura, cujas, características as qualificam como métodos de escarificação biológica, como o guandu anão e o nabo forrageiro utilizados neste estudo, não acontecem em um único ciclo de cultivo, uma vez que estas melhorias dependem além do efeito direto do crescimento de raízes, de efeitos indiretos. Entre os efeitos indiretos, destaca-se o efeito da atuação de organismos do solo, que ao atuar na decomposição das raízes destas plantas, contribuem para a estabilização da estrutura e, conseqüentemente, dos poros produzidos pelas raízes. Pode-se citar ainda, um provável aumento da atividade biológica do solo, resultante da melhoria das condições de fertilidade do solo, quer seja pela adição de nitrogênio pela fixação biológica ou pela ciclagem de nutrientes de camadas subsuperficiais. Assim a avaliação destas melhorias necessitam de um maior tempo de estudo e maior número de cultivos para que seus efeitos sejam melhor esclarecidos.

A utilização da escarificação para reduzir a compactação do solo, no presente estudo, mostrou que a realização de uma segunda operação cerca de quatro meses após a primeira, resultou em melhoria de algumas propriedades físicas do solo em diferentes profundidades, contudo de maneira pouco expressiva.

Isso evidencia que, após qualquer mobilização mecânica do solo, ocorre um processo de reconsolidação, que pode rapidamente levá-lo a retornar às condições anteriores à operação, especialmente quando o solo sofre tráfego de máquinas em condições de umidade elevada.

REFERÊNCIAS

ABREU, L.A.; REICHERT, D.J.; 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**, v. 33, p. 275-282, 2003.

ABREU, S. L. REICHERT, J. M. REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519-531, 2004.

AKINCI, I. et al. The effect of subsoiling on soil resistance and cotton yield. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.77, p.203–210, 2004.

AMARAL, A. J. BERTOL, I. COGO, N. P. BARBOSA, F. T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um cambissolo húmico da região do planalto sul-catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2145-2155, 2008.

ARGENTON, J. ALBUQUERQUE, J. A. BAYER, C. WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de prepare e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.

BERTOL I. ALBUQUERQUE, J. A. LEITE, D. AMARAL, A. J. ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas ao campo nativo. **Revista Brasileira da Ciência de Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois Latossolos. **Científico**, Jaboticabal, v. 24, p. 142-149, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em Latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 365-371, 2004.

BEUTLER, A. N. CENTURION, J. F. CENTURION, M. A. P. C. FREDDI, O. S. SOUSA NETO, E. L. LEONEL, C. L. SILVA, A. P. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 608-615, 2007.

BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. DOS; BOGNOLA, I. A.; CÚRCIO, G. R.; MANZATTO, C. V.; CARVALHO JUNIOR, W. DE; CHAGAS, C. DA S.; ÁGLIO, M. L.

D. & SOUZA, J. S. de. **Mapa de solos do Estado do Paraná: legenda atualizada.** Rio de Janeiro : EMBRAPA/CIAPAR. 2008. 74p.

BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; FRANCO FILHO, P.; PRETI, E. A.; CARDOSO, C. Crescimento de milho e guandu, desempenho de plantas cítricas e propriedades físicas do solo escarificado em um pomar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1409-1418, 2008.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos.** 7 ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto.** 2004. 126 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

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

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813-819, 2005.

CAMARGO de, O. A.; ALLEONI, L.R.F. Efeito da compactação no crescimento de Plantas. 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/C5/Index.htm>. Acesso em: 13/2/2010.

CARVALHO, G. J. CARVALHO, M. P. FREDDI, O. S. MARTINS, M. V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência a penetração do solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 765-771, 2006.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 117-124, jan. 2003.

COLLARES, G. L. **Compactação em Latossolos e Argissolo e relação com parâmetros de solo e de plantas.** 2005. 107 f. Tese (Doutorado em ciência do solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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

CONAB. Central de informações agropecuárias. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> . Acesso em: 17 dez. 2009.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

COSTA, F. S. ALBUQUERQUE, J. A. BAYER, C. FONTOURA, S. M. V. WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 527-535, 2003.

CUNHA, G. R. da; MALUF, J. R. T.; HAAS, J. C.; PASINATO, A.; PIMENTEL, M. B. M. Regionalização climática e suas implicações para o potencial de rendimento de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 23 p. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_bp11.htm> Acesso em: 20 de janeiro de 2010.

CUNHA, G. R. Palestra sobre previsões climáticas e a agricultura do sul do Brasil. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2002. 47 p. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_do23.htm> Acesso em: 24 de abril de 2010.

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

DENARDIN, J. E.; SCHAEFFER, R.; FAGANELLO, A.; KOCHHANN, R. A. Heterogeneidade física de um Latossolo argiloso manejado sob sistema plantio direto. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 70. 2009. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp70.pdf> Acesso em: 25 de fevereiro de 2010.

DESTRO, D.; MIGLIORANZA, E.; ARIAS, C. A.; VENDRAME, J. M.; ALMEIDA, J. C. V. Main Stem and Tiller Contribution to Wheat Cultivars Yield Under Different Irrigation Regimes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Vol. 44, n. 4, p. 325-330. December. 2001.

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

DONEDA, A. **Plantas de cobertura de solo consorciadas e em cultivo solteiro: decomposição e fornecimento de nitrogênio ao milho**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212p.

FAOStat. Base de dados estatísticos da agricultura mundial. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acesso em 20 jan. 2010.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BULL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 49-57, 2006.

FONTANELA, E. **Parâmetros físico-hídricos de um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo e níveis de tráfego**. 2008. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FOWLER, B. D. Estágios de crescimento do trigo. 2002. Disponível em: <http://www.usask.ca/agriculture/cropsci/winter_cereals> Acesso em 25 de janeiro de 2010.

FRANCESCHI, Lucia de. **Adaptabilidade, estabilidade e efeito de variáveis meteorológicas sobre a qualidade tecnológica de cultivares de trigo no estado do Paraná**. 2009. 103f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção Vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2009.

FREITAS, J. G.; CARDOSO, A. A.; SIGUEYUKISEDIYAMA, C.; FERREIRA, P. A; MOURA FILHO, W. Trigo: efeito de três faixas de umidade na evapotranspiração real e na produção de grãos e seus componentes. **Bragantia**, Campinas, v. 44, n. 2, p. 515-530, 1985.

FREITAS, J. G.; CAMARGO, C. E. O. Cultivar de trigo iac-24: rendimento de grãos e caracteres agrônômicos em três faixas de umidade do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 46, n. 2, p. 159-168, 1987.

GENRO JUNIOR, S.A. **Alteração da compactação do solo com o uso de rotação de culturas no sistema plantio direto**. 2002. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

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

GIRARDELLO, V. C. Qualidade física de um latossolo sob plantio direto submetido a escarificação de sítio específico e o rendimento da soja. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

GUARIENTI, E. M.; SANTOS, H. P.; LHAMBY, J. C. B. Influência do manejo do solo e da rotação de culturas na qualidade industrial do trigo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 25. n. 12, p. 2375-2382, 2000.

GUARIENTI, E. M. CIACCO, C. F. CUNHA, G. R. DEL DUCA, L. J. A. CAMARGO, C. M. O. Efeitos da precipitação pluvial, da umidade relativa do ar e de excesso e déficit hídrico do solo no peso do hectolitro, no peso de mil grãos e no rendimento de grãos de trigo. **Cienc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 25. n. 3, p. 412-418, 2005.

GUARIENTI, E. M. CIACCO, C. F. CUNHA, G. R. DEL DUCA, L. J. A. CAMARGO, C. M. O. Avaliação do efeito de variáveis meteorológicas na qualidade industrial e no rendimento de grãos de trigo pelo emprego de análise de componentes principais. **Cienc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 23. n. 3, p. 500-510, 2003.

GUBIANI, P. I. **Tempo para a ocorrência da resistência à penetração restritiva ao feijoeiro em solo com diferentes estados de compactação**. 2008. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

JIMENEZ, R. L. GONÇALVES, W. G. ARAUJO FILHO, J. V. ASSIS, R. L. PIRES, F. R. SILVA, G. P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 116-121, 2008.

HAKANSSON, I.; PETELKAU, H. Benefits of limited axle load. In: **Soil compactation in crop production**. Amsterdam: 1994. p. 479-500.

HAMADA, Emília. **Desenvolvimento fenológico do trigo (Cultivar IAC 24 – Tucuruí), comportamento espectral e utilização de imagens NOAA-ACHRR**. 2000. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

HILLEL, Daniel. **Environmental Soil Physics**. San Diego, Academic Press, 1998.

HUBNER, O. Trigo – safra 2008/09. Curitiba, 2009. 10 p. Disponível em <<http://www.seab.pr.gov.br>> Acesso em 07 de maio de 2010.

IBGE. Lavouras: produção de cereais e leguminosas. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_200912.comentarios.pdf> Acesso em: 20 de janeiro de 2010.

IGNACZAK, J. C.; MAURINA, A. C.; DE MORI, C.; FERREIRA FILHO, A. Uso de tecnologias em lavouras de trigo tecnicamente assistidas no Paraná – safra 2005. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 26 p. Disponível: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/bp/p_bp31.htm> Acesso em: 20 de janeiro de 2010.

- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979.
- KLAR, A. E. **A água no sistema solo, planta, atmosfera**. São Paulo, Nobel, 1984.
- KLEIN, V. A. LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 26, p. 857-867, 2002.
- KLEIN, V. A. CAMARA, R. K. Rendimento da soja em intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 221-227, 2007.
- KLEIN V. A. **Física do Solo**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2008.
- KLEIN, V. A.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; MASSING, J. P.; FAVERO, F. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 365-371, 2008.
- KLEIN, V. A.; BASSEGIO, M. MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481, dez, 2009.
- KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. É necessária a descontinuidade do sistema plantio direto após dez anos de adoção? Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. 7p. Disponível: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co43.htm> Acesso em: 23 de janeiro de 2010.
- KOCHHANN, R. A.; SANTOS, H. P. dos; VOSS, M.; DENARDIN, J. E. Rendimento de grãos de trigo cultivado em seqüência ao adubo verde nabo forrageiro. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2003. 12 p. html. (Comunicado Técnico Online, 116). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/co/p_co116.htm> Acesso em 23 de janeiro de 2010.
- KOOISTRA, M. J. TOVEY, N. K. **Effects of compaction on soil microstructure**. In: Soil compactation in crop production. Amsterdam: 1994. p. 91-113.
- LETEY, J. Relationship between soil physical conditions and crop production. **Adv. Soil Sci**, v. 1, p. 277-293, 1985.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, 2006.
- 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**, v. 45, n. 1, p. 89-98, 2010.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 175-187, 2004.

MARCOLIN, C. **Uso de funções de pedotransferência entre atributos físicos de solo sob plantio direto**. 2009, 187f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. Santa Maria, 2006. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Setor de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria.

MELLO, N. A. Degradação física dos solos sob integração lavoura pecuária. In: I ENCONTRO DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NO SUL DO BRASIL, 2002, Pato Branco. **Anais...** Pato Branco – PR: CEFET-PR, 2002, p. 43-60.

MOTA, Fernando Silveira da. Clima e Zoneamento para a triticultura no Brasil. In: **Trigo no Brasil**. Campinas: 1982. p. 27-61.

MUNDSTOCK, C. M. BREDEMEIER, C. A cv. de trigo Embrapa 16 responde ao nitrogênio aplicado no final do afilhamento. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO. 18, 1999, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999. p. 700-704.

NICOLOSO, R. S. AMADO, T. J. C. SCHNEIDER, S. LANZANOVA, M. N. 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 da Ciência do Solo**, v. 32, p. 1723-1734, 2008.

NOVAK, L. R.; MANTOVANI, E. C.; MARTYN, P. J.; FERNANDES, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro álico em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 27, n. 12, p. 1587-1595, 1992.

OLESEN, J. E. & MUNKHOLM, L. J. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on crop yield. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.94, p.376–38, 2007.

OSORIO, Eduardo A. **A Cultura do trigo**. São Paulo: Globo, 1992.

PEDROTTI, A. PAULETTO, E. A. CRESTANA, S. FERREIRA, M. M. DIAS JUNIOR, M. GOMES, A. S. TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.

PIKUL Jr., J.L. & AASE, J.K. Wheat response and residual soil properties following subsoiling of a sandy loam in eastern Montana. *Soil Till. Res.*, Amsterdam, v.51, p.61-70, 1999.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3 ed. São Paulo, Oficina de textos. 2006.

POSSENTI J. C.; GOUVEA A. G.; MARTIN T. N. ; CADORE D.. Distribuição da precipitação pluvial em Dois Vizinhos, Paraná, Brasil. In: I **Seminário Sistemas de Produção Agropecuária**, p. 140-142, 2007.

REDIN, M. **Composição química e decomposição da parte aérea e raízes de culturas comerciais e de plantas de cobertura de solo**. 2010. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

REICHART, K. TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP, Manole, 2004.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade agrícola. **Ciência e Ambiente**, n. 27, 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos e Mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**. Vol 1, Viçosa, 2007. p. 49-134.

REICHERT, J. M. ; SUZUKI, L. E. A. S. ; REINERT, D. J. ; HORN, R. HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, Amsterdam. 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 da Ciência do Solo**, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

REUNIÃO DA COMISSÃO CENTRO-SUL BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 34., 2002, Porto Alegre. Indicações Técnicas da Comissão Sul Brasileira de Pesquisa de Trigo. 2002. Porto Alegre: FEPAGRO, 2002. 79 p.

REUNIÃO DA COMISSÃO CENTRO-SUL BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO, 19., 2004, Londrina. Informações Técnicas Das Comissões Centro-Sul Brasileira de Pesquisa de Trigo e de Triticale Para a Safra 2004. Londrina, Iapar – Embrapa Soja, 2004. 218 p.

RODRIGUES, O.; LHAMBY, J. C. B.; DIDONET, A. D.; MARCHESE, J. A.; SCIPIONI, C. Efeito da deficiência hídrica na produção de trigo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, 839-846, 1998.

RODRIGUES, O. **Características fisiológicas associadas ao avanço no potencial de rendimento de grãos de trigo**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 6, 2002.

ROSA D. P.; REICHERT J. M.; SATLLER A.; REINERT D. J.; MENTGES M. I. VIEIRA D. A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 3, p. 395-400, 2008.

ROSA, V. T. **Tempo de implantação do sistema plantio direto e propriedades físico-mecânicas de um Latossolo**. 2009. 101 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ROSSATO, Rodrigo R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo sob plantio direto**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

SANTI, A.L. **Relações entre indicadores de qualidade do solo e a produtividade das culturas em áreas com agricultura de precisão**. 2007, 175f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

SECCO D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003, 108f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SECCO, D.; DA ROS, C. O.; SECCO, J. K.; FIORIN, J. E. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo Vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 29, p. 407-414, 2005.

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, n. 1, p. 58-64, 2009.

SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003, 171f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

SILVA, A. R. DIAS JUNIOR, M. S. GUIMARÃES, T. G. ARAUJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um latossolo amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de ciência do Solo**, v. 30, p. 207-216, 2006.

SILVA, A. J. N. CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 921-930, 2006.

SILVA, S. R.; BARROS N. F.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S.; LEITE, F. P.; Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um "forwarder" nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 371-377, 2007.

SILVA, R.R. BENIN, G. HAGEMANN, T. R. MALAGI, G. LEMES, C. PAGLIOSA, E. BECHE, E. SIGNORINI, A. Fertilidade de afilhos em genótipos de trigo avaliados em diferentes densidades de semeadura. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO E TRITICALE. 2008, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. p. 41-43.

SIMMONS, S. R. OELKE, E. A. ANDERSON, P. M. Growth and development guide for spring wheat. Disponível em: <http://www.extension.umn.edu>. Acesso em: 20 de janeiro de 2010.

SOANE, B.D. .The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. **Soil Till. Res.**, Amsterdam, v.16, p.179-201, 1990.

SOANE, B. D; OUWERKERK, C. van. Soil compaction problems in world agriculture. In: **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: 1994. p. 1-23.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; TOMM, G. O.; KOCHHANN, R. A.; ÁVILA, A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1079-1093, 2009.

STONE L. F. SILVEIRA P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 25, p. 395 – 401, 2001.

STRECK, C. A. REINERT, D. J. REICHERT, J. M. KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005, 151f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

TOIGO, S. ; BRAIDA, J. A. ; CARNIELETTO, C. E. . Diagnóstico das condições químicas e físicas do solo em áreas sob plantio direto no município de Flor da Serra do Sul, PR. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007, Gramado. **Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2007.

TORMENA, C. A. ROLOFF, G. SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 22, p. 301-309, 1998.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:1023-1031, 2004.

VALÉRIO, I. P.; CARVALHO, F. I.; OLIVEIRA, A. C.; ALMEIDA, M. A.; BENIN, G.; SCHEEREN, P. D.; SOUZA, V. Q.; HARTWIG, I. Desenvolvimento de afixos e componentes do rendimento em genótipos de trigo sob diferentes densidades de semeadura. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília, v.43, n.3, p.319-326, março 2008.

VEIGA, M. **Propriedades de um Nitossolo vermelho após nove anos de uso de sistemas de manejo e efeito sobre culturas**. 2005, 126f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VEIGA, M. ; HORN, R. ; REINERT, D. J. ; REICHERT, J. M. . Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. In press, p. 104-113, 2006.

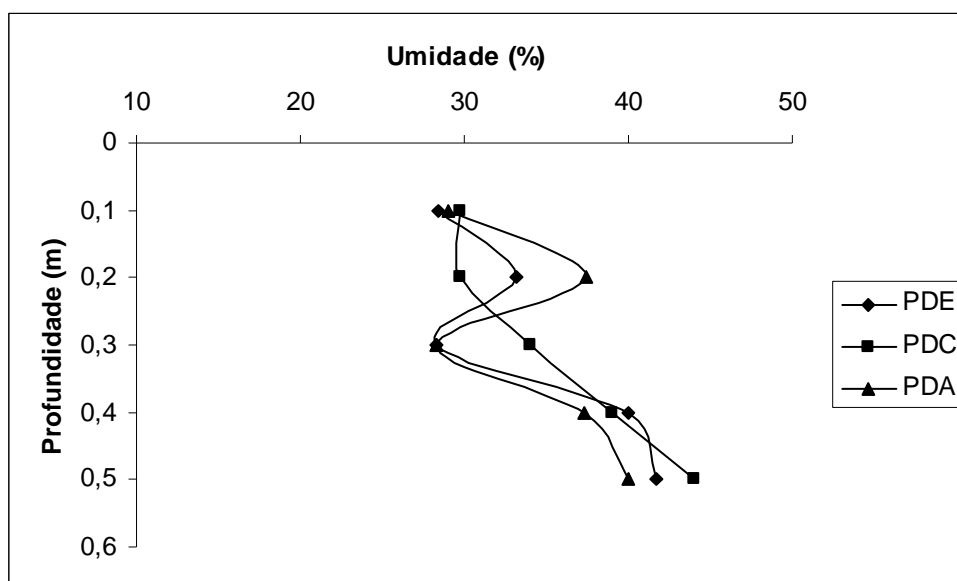
ZONTA, E. P. MACHADO, A. D. SILVEIRA JUNIOR, P. Sistemas de análise estatística para microcomputadores – SANEST. Pelotas, UFPel, 1984.

ÍNDICE DE APÊNDICES

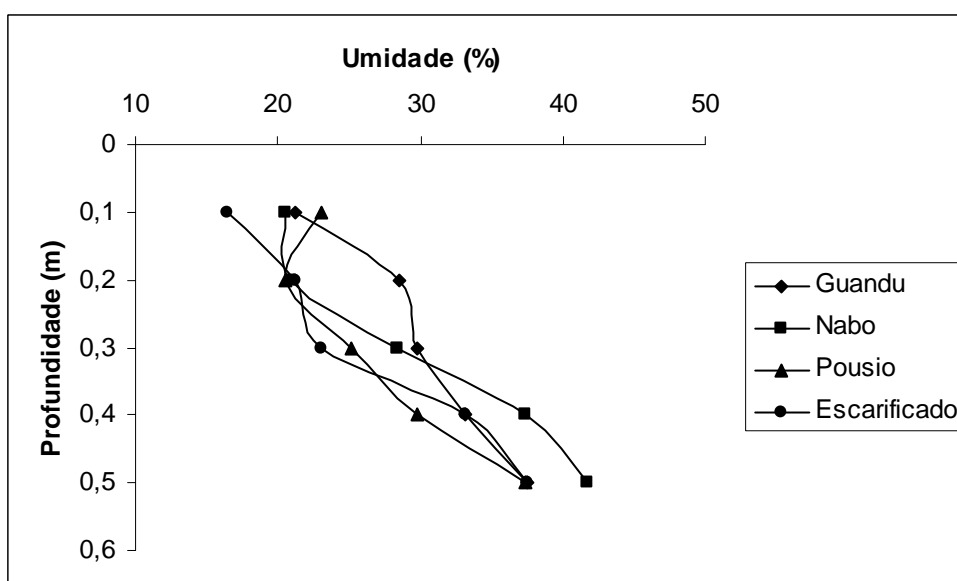
- APÊNDICE 01 – Umidade gravimétrica do solo (%) no momento da determinação da Resistência à Penetração, nos diferentes níveis de compactação e profundidades, UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010..... 74
- APÊNDICE 02 – Umidade gravimétrica do solo (%) no momento da determinação da Resistência à Penetração, nos tratamentos correspondentes aos sistemas de manejo de recuperação do solo e profundidades, UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010..... 74
- APÊNDICE 03 - Valores de F para as variáveis densidade do solo (Ds), porosidade total (PT)\, macroporosidade (Pma), microporosidade (Pmi) e resistência à penetração (RP) em função dos níveis de compactação iniciais e sistemas de manejo de recuperação do solo em cinco diferentes profundidades. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.....75
- APÊNDICE 04 - Valor de F das variáveis Número de plantas por m² (NP), Número de espigas por m² (NE), Massa das espigas (ME), Número de grãos por espiga (NGE), Número de espiguetas por espiga (NEE), Grãos por espiguetas (GE), Rendimento de grãos e PH.76

APÊNDICES

APÊNDICE 01 – Umidade gravimétrica do solo (%) no dia da realização da amostragem de solo para determinação das avaliações, nos diferentes níveis de compactação e profundidades, UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.



APÊNDICE 02 – Umidade gravimétrica do solo (%) no dia da realização da amostragem de solo para determinação das avaliações, nos tratamentos correspondentes aos sistemas de manejo de recuperação do solo e profundidades, UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.



APÊNDICE 03 - Valores de F para as variáveis densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), macroporosidade (Pma), microporosidade (Pmi) e resistência à penetração (RP) em função dos níveis de compactação iniciais e sistemas de manejo de recuperação do solo em cinco diferentes profundidades. UTFPR, Campus Dois Vizinhos, 2010.

Causas da variação	Ds	PT	Pma	Pmi	RP
Profundidade 0,0 – 0,05 m					
Níveis de compactação	11,2799*	14,6712	8,4318*	2,9868 ^{ns}	7,6752*
Sistemas de Manejo	3,0207*	1,3604 ^{ns}	3,5961*	3,4650*	3,0880*
Interação NC*SM	0,6086 ^{ns}	0,3439 ^{ns}	1,5121 ^{ns}	1,9977 ^{ns}	1,1812 ^{ns}
Profundidade 0,05 – 0,10 m					
Níveis de compactação	13,3627**	4,9227 ^{ns}	3,6238 ^{ns}	1,4203 ^{ns}	6,8408 ^{ns}
Sistemas de Manejo	2,2882 ^{ns}	7,1530**	1,6222 ^{ns}	0,6035 ^{ns}	4,7818*
Interação NC*SM	0,5167 ^{ns}	2,1336 ^{ns}	0,9715 ^{ns}	1,3550 ^{ns}	0,9795 ^{ns}
Profundidade 0,10 – 0,15 m					
Níveis de compactação	4,7152 ^{ns}	7,7949	3,5734 ^{ns}	1,1754 ^{ns}	12,2482*
Sistemas de Manejo	3,8786*	0,8552 ^{ns}	2,4132 ^{ns}	2,2745 ^{ns}	6,4797**
Interação NC*SM	2,1054	3,4935*	3,6454*	0,9717 ^{ns}	0,8975 ^{ns}
Profundidade 0,15 – 0,20 m					
Níveis de compactação	1,2022 ^{ns}	2,6384 ^{ns}	8,8148*	6,8646*	7,8779*
Sistemas de Manejo	2,4336 ^{ns}	1,4407 ^{ns}	1,2230 ^{ns}	0,0635 ^{ns}	3,3399*
Interação NC*SM	3,6149*	0,5862 ^{ns}	1,3067 ^{ns}	2,0157 ^{ns}	1,2383 ^{ns}
Profundidade 0,20 – 0,25 m					
Níveis de compactação	0,5048 ^{ns}	1,0278 ^{ns}	0,7557 ^{ns}	0,2321 ^{ns}	3,9606 ^{ns}
Sistemas de Manejo	0,3553 ^{ns}	0,4229 ^{ns}	0,7299 ^{ns}	0,3320 ^{ns}	1,4012 ^{ns}
Interação NC*SM	0,6081 ^{ns}	0,2955 ^{ns}	0,9240 ^{ns}	1,8373 ^{ns}	1,3399 ^{ns}

^{ns} não significativo $p > 0,05$

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$)

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

APÊNDICE 04 - Valor de F das variáveis Número de plantas por m² (NP), Número de espigas por m² (NE), Massa das espigas (ME), Número de grãos por espiga (NGE), Número de espiguetas por espiga (NEE), Grãos por espiguetas (GE), Rendimento de grãos e PH.

Causas da variação	NP	NE	ME	NGE	NEE	GE	MMG	REND	PH
Níveis de compactação (A)	0,9251 ^{ns}	0,7709 ^{ns}	2,7374 ^{ns}	10,7308 [*]	8,3062 [*]	4,1445 ^{ns}	4,3459 ^{ns}	0,0970 ^{ns}	2,2845 ^{ns}
Sistemas de Manejo (B)	0,1793 ^{ns}	0,3186 ^{ns}	1,7716 ^{ns}	1,6632 ^{ns}	0,9188 ^{ns}	9,0202 ^{**}	1,4784 ^{ns}	1,1003 ^{ns}	1,4210 ^{ns}
Interação A*B	1,5169 ^{ns}	0,8901 ^{ns}	2,7372 [*]	1,0322 ^{ns}	1,9422 ^{ns}	4,5377 ^{**}	1,5788 ^{ns}	3,5732 [*]	0,8368 ^{ns}

^{ns} não significativo p>0,05

^{*} significativo ao nível de 5% de probabilidade (0,01 ≤ p < 0,05)

^{**} significativo ao nível de 1% de probabilidade (p<0,01)