

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

**Varição temporal da densidade do solo e do grau de compactação
de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**

Sâmala Glícia Carneiro Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2011**

Sâmala Glícia Carneiro Silva
Engenheiro Agrônomo

**Varição temporal da densidade do solo e do grau de compactação
de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado**

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2011

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

Silva, Sâmala Glícia Carneiro

Varição temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um latossolo
vermelho sob plantio direto escarificado / Sâmala Glícia Carneiro Silva. - - Piracicaba, 2011.
65 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.
Bibliografia.

1. Compactação dos solos 2. Densidade do solo 3. Física do solo 4. Plantio do solo
Semeadura I. Título

CDD 631.43
S586v

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

DEDICO

A Deus, por ser minha fortaleza e socorro presente nos momentos de dificuldade, e por me dar segurança e perfeita paz em meio as dúvidas.

OFEREÇO

Aos meus pais, Silvio Bezerra Silva e Elizete Carneiro Silva por serem meus grandes exemplos de vida, e por me incentivarem a lutar pelos meus sonhos e não desistir deles.

Aos meus irmãos, Thalison Carneiro Silva e Cleison Carneiro Silva pelo companheirismo nos momentos de presença e compreensão nos momentos de ausência.

“Ainda que as figueiras não produzam frutas, e as parreiras não dêem uvas; ainda que não haja azeitonas para apanhar nem trigo para colher; ainda que não haja mais ovelhas nos campos nem gado nos currais, mesmo assim eu darei graças ao SENHOR e louvarei a Deus, o meu Salvador.”

Habacuque 3.17,18 – Bíblia Sagrada

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de cursar o mestrado e executar o presente projeto;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida durante o mestrado;

Ao prof. Dr. Álvaro Pires da Silva, pela orientação e apoio durante todo este período;

A prof^a Neyde Fabíola Balarezo Giarola pela concessão da área experimental e pelas fundamentais contribuições e sugestões dadas durante toda a condução deste trabalho;

Ao prof. Cássio Antônio Tormena, pelas valiosas sugestões;

A prof^a Herdjanía Veras de Lima, pelos conselhos e incentivo à carreira da pesquisa através da orientação na iniciação científica e ingresso no mestrado;

A Lilian Martins e suas filhas de sangue Lilian, Rute, Fabiane e a filha de coração Paula, pela acolhida na minha chegada em Piracicaba, sou muito grata a vocês! Que Deus lhes retribua em dobro o carinho e amor que me dedicaram;

A Marise e Paula Fabiane, pela amizade e bons momentos compartilhados;

A equipe da Física do Solo: Clevea, Osvaldo, Sueli, Edson, Getúlio, Marina e Sérgio pelo apoio e bom convívio;

Ao Raul, pelo companheirismo, paciência e palavras de carinho e conforto quando precisei;

A todos os meus amigos de longe, de perto, aos de longa data e as novas amigadas, muito obrigada pelo carinho e incentivo que me ajudaram a concluir esta etapa e continuar a jornada.

Obrigada a todos de coração!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 DESENVOLVIMENTO	19
2.1 Revisão Bibliográfica.....	19
2.1.1 Mecanismos de compactação do solo.....	19
2.1.2 Propriedades físicas do solo afetadas pela compactação.....	21
2.1.3 Efeito da compactação no desenvolvimento das plantas.....	26
2.1.4 Influência da descompactação mecânica sobre os atributos físicos do solo.....	28
2.2 Material e Métodos.....	31
2.2.1 Características gerais da área de estudo.....	31
2.2.2 Solos e clima.....	32
2.2.3 Delineamento experimental e amostragem.....	34
2.2.4 Análises realizadas.....	37
2.2.4.1 Textura do solo e densidade de partículas.....	37
2.2.4.2 Densidade do solo.....	37
2.2.4.3 Determinação da Densidade do solo máxima e grau de compactação.....	37
2.2.5 Análise estatística.....	39
2.3 Resultados e discussão.....	39
2.3.1 Densidade do solo (Ds) antes da escarificação.....	41
2.3.2 Variação da Ds após a escarificação.....	43
2.3.3 Grau de compactação (Gc) ou compactação relativa.....	50
3 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	57

RESUMO

Variação temporal da densidade do solo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado

Estudos mostram que ocorre uma compactação superficial após alguns anos de utilização do sistema plantio direto (SPD), podendo interferir no desenvolvimento das plantas. A escarificação tem sido utilizada para amenizar os efeitos da compactação sob SPD, porém há evidências de que seus efeitos são de curta duração. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de alguns parâmetros físicos após a escarificação em curto prazo (um ano) nas seguintes profundidades: 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m; 0,30-0,40 m. A densidade do solo (D_s) e o grau de compactação (G_c) foram analisados em área de plantio direto por 16 anos (PD), imediatamente após a escarificação (ESC), seis meses (ESC6M) e um ano após a escarificação (ESC12M). Nas camadas superiores a densidade do solo apresentou variação semelhante, com redução significativa em ESC e um aumento expressivo em ESC6M, sendo que a D_s retornou aos valores registrados antes da mobilização em ESC12M. Nos períodos ESC, ESC6M e ESC12M foi observado um aumento da D_s na camada 0,30-0,40 m em comparação com o PD. A escarificação provocou redução do grau de compactação nas camadas 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, com o G_c retornando aos valores originais um ano após a escarificação. Os maiores valores de G_c foram observados seis meses após a escarificação, porém o solo apresentou grande recuperação visto que em ESC12M o grau de compactação apresentou tendência de retorno aos valores originais em todas as profundidades, possivelmente devido à alta resiliência do solo. Os efeitos da escarificação avaliados pela D_s e G_c apresentaram duração inferior a um ano, sugerindo que neste solo não é necessária esta operação.

Palavras-chave: Compactação do solo; Resiliência do solo; Semeadura direta; Qualidade física do solo

ABSTRACT

Temporal variation of soil bulk density and degree of compactness of an Oxisol under no-tillage chiseled

Studies show that a surface compaction occurs after some year's adoption of no-tillage (NT), which may interfere in plant development. Chiseling has been used to alleviate the effects of soil compaction under NT, but studies show that this operation has short-term effects. The aim of this study was to evaluate the behavior of some physical parameters after chiseling in short-term (one year) in the following depths: 0.0 to 0.10 m, 0.10-0.20 m, 0.20-0.30 m, 0.30 to 0.40 m. Soil bulk density (BD) and the degree of compactness (DC) were analyzed in long-term (16 years) no-tillage (NT), chiseling of the long-term no-tillage (CHI), six months (CHI6M) and one year after chiseling (CHI12M). In top layers bulk density showed similar variation, with significant reduction in CHI and a marked increase in CHI6M, returning to the values recorded before mobilization in CHI12M. In periods CHI, CHI6M and CHI12M was an increase in the BD 0.30-0.40 m layer in comparison with NT. Chiseling caused a reduction the degree of compaction in the layers 0.0-0.10 m and 0.10-0.20 m, with DC returning to the original values one year after chiseling. The greatest DC values were observed six months after chiseling, nevertheless the soil showed great recovery whereas in CHI12M the degree of compactness tended to return to the original values in all layers, possibly due the high soil resilience. The duration of chiseling effects measured by BD and DC was less than one year, suggesting in this soil is not necessary this operation.

Keywords: Soil compaction; Soil resilience; No-tillage; Soil physical quality

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização espacial da área do experimento em Ponta Grossa/PR.....	32
Figura 2 -	Dados de precipitação pluviométrica do período de avaliação do experimento em Ponta Grossa. Fonte: Estação meteorológica da Fazenda Escola “Capão da Onça” – UEPG.....	34
Figura 3 -	Subsolador utilizado para a operação de mobilização do solo.....	35
Figura 4 -	Esquema da coleta das amostras na área experimental. Fonte: Google Earth (2009).....	36
Figura 5 -	Introdução do anel volumétrico no solo com o amostrador eletrônico (a) retirada da amostra após o final do curso do equipamento (b).....	36
Figura 6 -	Consolidômetro pneumático utilizado para o ensaio de compressão uniaxial.....	38
Figura 7 -	Valores médios e intervalos de confiança da média para a densidade do solo antes da escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%) nas diferentes profundidades avaliadas.....	41
Figura 8 -	Valores médios e intervalos de confiança da média para a densidade do solo das épocas em estudo. PD: Plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; EC6M: 6 meses após a escarificação; EC12M: 12 meses após a escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%).....	44
Figura 9 -	Gráficos de precipitação pluviométrica diária durante o período do experimento. Picos de precipitação situados acima da linha pontilhada indicam a ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem do solo.....	48
Figura 10 -	Comportamento da variação temporal da densidade do solo nas profundidades estudadas. PD: plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; SB6M: 6 meses após a escarificação; SB12M: 12 meses após a escarificação.....	49
Figura 11 -	Valores médios e intervalos de confiança da média para o grau de compactação do solo das épocas em estudo. PD: Plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; EC6M: 6 meses após a escarificação; EC12M: 12 meses após a escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%).....	51

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional exige que os sistemas agrícolas verticalizem a produtividade e ao mesmo tempo mantenham a qualidade do solo, da água e do ar num contexto de sustentabilidade agronômica, econômica e sócio-ambiental. Num cenário de demanda crescente por alimentos tanto em aspectos qualitativos como quantitativos, é imprescindível que o solo ofereça condições favoráveis para que as plantas expressem o seu potencial genético de produtividade, aumentando a pressão por sistemas de uso e manejo do solo que melhorem e/ou mantenham a qualidade do solo necessário para prover as plantas com água, oxigênio e nutrientes.

A qualidade do solo consiste na capacidade do solo, dentro dos limites dos ecossistemas naturais ou manejados, em sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou aumentar a qualidade da água e do ar, e a saúde humana (KARLEN et al., 2001). A qualidade integral do solo é formada pelos componentes de qualidade física, química e biológica. Dentre estes, a qualidade física do solo é composta de um conjunto de fatores, como o desenvolvimento adequado da fauna e a flora, baixa lixiviação de nutrientes para além da zona radicular e a não degradação do solo pelas operações de preparo. Tais fatores em equilíbrio se constituem no estado de “boa qualidade física do solo”. Manter uma qualidade física adequada envolve uma otimização cuidadosa de todos os principais atributos e propriedades físicas do solo (TOPP et al., 1997).

O manejo do solo é um dos principais fatores que governam a sua qualidade física, tendo em vista que ele influencia diretamente a estrutura do solo, causando modificações no espaço poroso e na habilidade do solo em reter, transmitir e infiltrar água, resistir aos estresses causados pelas máquinas e processos erosivos bem como em prover as plantas com água, oxigênio, nutrientes e crescimento radicular (DEXTER, 1988). A agricultura surgiu com o preparo do solo, cujo objetivo era criar um meio de semeadura adequada, facilitar o aquecimento dos solos sob clima temperado, controlar ervas daninhas e pragas do solo, incorporar resíduos, fertilizantes e corretivos, entre outros.

Nas regiões tropicais e subtropicais, os sistemas de preparo com revolvimento intensivo provocaram a rápida degradação do solo em função da elevada erosividade, promovendo redução da matéria orgânica, perda das camadas superficiais mais férteis, compactação do solo, que se reflete em problemas de natureza econômica, social e ambiental.

Neste contexto, sistemas com mínima mobilização do solo apresentaram-se como práticas alternativas para a redução da degradação física, química e biológica do solo. O sistema plantio direto (SPD), alicerçado em mínima mobilização do solo, manutenção dos resíduos culturais na superfície e rotação ou diversificação dos cultivos agrícolas tem-se destacado positivamente nas regiões tropicais.

O SPD é considerado uma das principais inovações tecnológicas na agricultura mundial e, no Brasil, é utilizado em cerca de 50% da área cultivada com culturas produtoras de grãos. Na safra 2005/2006 a área cultivada no Brasil atingiu 25,5 milhões de hectares (FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA - FEBRAPDP, 2010).

Atualmente a região Sul do Brasil é a maior produtora de grãos do país, com um total de 63 milhões de toneladas de grãos na safra 2009/2010. Neste cenário, o estado do Paraná se destaca como o principal produtor da região, com produção de aproximadamente 31 mil toneladas, o que corresponde a quase metade da produção total da região Sul (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010). O sistema plantio direto teve grande expansão no Paraná, visto que somente com culturas anuais são 5,7 milhões de hectares. Atualmente 90% da área cultivada no estado com soja, principal cultura do Paraná, é manejada segundo o sistema plantio direto (BUBLITZ, 2009).

No sistema plantio direto, o solo é revolvido de forma localizada na linha de semeadura, formando um sulco de largura e profundidade suficientes para a adequada colocação da semente e fertilizantes. A ausência de revolvimento e a ocorrência de tráfego de máquinas têm sido apontadas como os fatores que favorecem a ocorrência de compactação do solo em superfície, especialmente quando comparado com sistema de preparo mínimo e convencional do solo. Por outro lado, a manutenção de resíduos culturais na superfície contribui para aumentar o teor de matéria orgânica do solo, e poderia reduzir os efeitos do tráfego, o que nem sempre tem sido comprovado. Frente a isso, métodos mecânicos (escarificação ou subsolagem) e/ou vegetativos (culturas de cobertura com sistema radicular agressivo) têm sido utilizados como estratégia para a recuperação física de solos compactados sob SPD.

A condição física do solo nos diferentes sistemas de manejo tem sido avaliada por meio de diversos parâmetros. A densidade do solo é a propriedade física mais comumente utilizada nestes estudos, por ser de fácil determinação, de baixo custo e utilizar materiais relativamente simples. No entanto, a densidade é dependente da composição granulométrica e do

teor de matéria orgânica do solo e, isoladamente, não indica o grau de limitação física do solo. Por isso, a utilização da densidade do solo relativa, que é a razão entre a densidade do solo e a densidade do solo de referência ou máxima obtida por testes padronizados, tem sido utilizada para quantificar o estado físico do solo ligado ao crescimento das plantas. A densidade relativa ou grau de compactação do solo pode ser utilizado como um indicador do solo para quantificar o estado de compactação presente em uma área em função de diferentes sistemas de manejo.

A hipótese estabelecida neste trabalho é que a duração dos efeitos da escarificação na descompactação do solo, medida pelo grau de compactação (G_c), é efêmera. O objetivo geral deste estudo foi verificar a variação temporal da densidade e grau de compactação de um Latossolo Vermelho cultivado sob SPD há quinze anos consecutivos após a escarificação. Os objetivos específicos foram: a) avaliar a densidade do solo e do grau de compactação em quatro profundidades de uma área sob sistema plantio direto; b) caracterizar a variação temporal da densidade e do grau de compactação em três épocas distintas: imediatamente após a escarificação, 6 meses e 12 meses após a escarificação do solo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Mecanismos de compactação do solo

A evolução e a modernização dos implementos agrícolas intensificaram as práticas de manejo sobre o solo. O tráfego excessivo de máquinas em condições inapropriadas tem contribuído para o aumento do problema da compactação (REICHERT et al., 2007).

Baver et al. (1972) definiram que a compactação do solo é um fenômeno mecânico, mediante ao qual sua densidade aumenta como resultado de cargas ou pressões aplicadas. Gupta e Allmaras (1987) conceituaram a compactação do solo como o processo de compressão do solo não saturado, que resulta no aumento da densidade em consequência da redução do seu volume devido à expulsão de ar dos poros do solo.

A compactação é definida como sendo um processo pelo qual ocorre o rearranjo dos agregados devido à diminuição dos espaços entre os agregados, fazendo com que os as partículas fiquem mais próximas, aumentando a densidade do solo (SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA - 2010). A compactação do solo está diretamente relacionada com a agregação do solo, já que o seu arranjo espacial é alterado tanto entre como dentro dos agregados (DEFOSSEZ; RICHARD, 2002).

De acordo com Horn et al. (1995), em solos sob condições naturais, o processo de agregação do solo se encontra em estado de equilíbrio, onde a formação de agregados sofre influência do processo de expansão e contração e da atividade biológica, dando origem a um sistema poroso complexo e com ampla variedade de tamanhos de poros. Com o excesso de tráfego, principalmente em condições de solo úmido onde a água atua como agente lubrificante, a força exercida pelas máquinas causa um rearranjo das partículas, aumentando a densidade do solo (REICHERT et al., 2007).

Sob a perspectiva da influência da mecanização nos sistemas de manejo, Håkansson et al. (1988) enfatizam que os fatores decisivos para a compactação são a pressão de ar dos pneus, a umidade do solo e intensidade de tráfego das máquinas. Streck et al. (2004) verificaram que o tráfego contínuo de máquinas sobre o solo aumentou a densidade e a resistência do solo à penetração e reduziu a porosidade total e a macroporosidade. Giarola et al.

(2009) também observaram estas modificações após compactação provocada por quatro passadas de um trator em um solo com textura muito argilosa.

As forças que geram o ciclo de compactação e descompactação do solo podem ser classificadas em internas e externas, (REICHERT et al., 2007). Ciclos de umedecimento e secagem, congelamento e degelo em locais de clima temperado, e a contração do solo correspondem às forças internas. As forças externas consistem da passagem de máquinas, animais e a pressão de crescimento exercida pelas raízes, as quais são as que mais influenciam a compactação causada pela ação antrópica.

Entre os fatores internos podem-se destacar os ciclos de umedecimento e secagem. Dexter (1991) ressaltam que em solos de textura média a argilosa, no processo de secagem do solo, ocorre a sua contração e formam-se fissuras, que podem se tornar importantes vias para uma rápida infiltração da água e trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Por outro lado, quando o solo umedece, as fissuras se dilatam lentamente, até desaparecerem. A velocidade e frequência de ocorrência destes ciclos são os responsáveis por minimizar a compactação, indicando que o solo apresenta resiliência e que a compactação pode ser aliviada por processos naturais.

A resiliência é um dos processos naturais que influenciam a compactação do solo, a qual é definida como a habilidade do solo em recuperar sua integridade funcional e estrutural após uma perturbação externa é chamada de resiliência (KAY, 1990; SEYBOLD et al., 1999). A resiliência física do solo é composta por uma série de processos regenerativos que incluem ciclos de umedecimento e secagem e atividade biológica, tais como o crescimento de raízes e atividade da fauna do solo (GREGORY et al., 2007). Quando a pressão aplicada ao solo for maior do que a sua capacidade de recuperação, ocorre a compactação e a degradação na estrutura do solo.

Uma das propriedades físicas que mais influenciam a susceptibilidade do solo à compactação e a resiliência física do solo é a textura. Solos argilosos suportam maiores pressões, porém são mais susceptíveis à compactação, que se deve ao fato de que a maiores tensões, os solos argilosos são capazes de reter maior umidade do que solos arenosos (SUZUKI et al., 2008). Entretanto, Gregory et al. (2007) afirma que os solos argilosos possuem maior resiliência, pois o provável aumento na pressão da água nos poros que não foi expulsa durante a compactação pode suportar uma parte do estresse total exercida sobre o solo, o que pode proteger a estrutura do solo contra a degradação. Após a retirada do estresse aplicado, a redistribuição de água que ocorre

pode fazer com que haja uma rápida recuperação elástica do espaço poroso perdido, o que reforça a importância do planejamento do tráfego de máquinas em condições adequadas de umidade.

2.1.2 Propriedades físicas do solo afetadas pela compactação

Praticamente todas as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo são modificadas em algum grau pela compactação do solo. É um processo que altera a estrutura através da quebra dos agregados, ocorrendo um rearranjo das partículas, modificando a configuração do espaço poroso do solo (RAGHAVAN et al., 1990; HÅKANSSON, 2005). As mudanças de volume são acompanhadas por alterações nas propriedades estruturais, na condutividade térmica e hidráulica e em características de transferências gasosas, afetando o balanço químico e biológico do solo.

As conseqüências da compactação nas propriedades físicas do solo são a diminuição da porosidade total e macroporosidade, redução da aeração e infiltração de água no solo e aumento da resistência à penetração e da densidade do solo. Como os macroporos são os responsáveis pela condução de O₂ e água através do perfil, e a perda destes poros leva à diminuição das trocas gasosas (CAMARA; KLEIN, 2005a; GENRO JUNIOR et al., 2009). Já os microporos são os responsáveis pela retenção de água no solo, e com a redução do tamanho dos poros a água estará mais fortemente retida, dificultando a sua absorção pelas plantas (IMHOFF et al., 2001; BATEY, 2009).

A ocorrência de camadas compactadas no solo diminui a aeração do solo, que é responsável pelo armazenamento e condução do ar no interior do solo. Quando ocorre a compactação, devido o excesso de umidade no solo, a porosidade de aeração comumente atinge valores menores do que 10%, o qual prejudica a difusão de gases, limitando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e o rendimento das culturas. Boone et al. (1986) constataram a reduzida aeração na capacidade de campo em solos severamente compactados, a qual foi relacionada com a baixa produtividade da cultura do milho. Tormena et al. (1998) verificaram que na camada superficial o tráfego de máquinas reduziu a porosidade de aeração para valores próximos de zero em comparação com a área não trafegada.

A diminuição da macroporosidade provocada pela compactação também prejudica a infiltração de água, afetando negativamente a condutividade hidráulica (Ksat) do solo. Blanco-

Canqui et al. (2004) verificaram que a K_{sat} foi três vezes menor em solo com tráfego intenso de máquinas em comparação a sistemas que adotaram tráfego reduzido. Em uma área conduzida sob SPD por 8 anos que apresentava camadas compactadas, Blanco-Canqui et al. (2010) observaram redução da condutividade hidráulica saturada, sugerindo então que a compactação pode reduzir a infiltração da água da chuva ou da lâmina de água aplicada durante a irrigação.

A resistência à penetração (RP) está diretamente relacionada à ocorrência da compactação, devido à sua estreita relação com a diminuição da densidade e porosidade do solo. Streck et al. (2004) avaliaram os efeitos da compactação adicional provocado pelo trânsito de máquinas sob PD, concluindo que os valores de RP aumentaram de acordo com a intensidade do tráfego. Collares et al. (2008) observaram que a compactação adicional exercida por quatro passadas de trator aumentou a RP nas camadas mais superficiais, e mesmo quando o solo apresentou alta umidade os valores de resistência permaneceram acima de 2 MPa, o qual é limitante para o crescimento das plantas, o que caracteriza um grave estado de compactação do solo.

Uma propriedade física comumente utilizada para caracterizar o estado de compactação é a densidade do solo (D_s), que é definida pela relação de massa de solo seca por unidade de volume. A D_s é capaz de detectar modificações de volume (LIPIEC; HATANO, 2003; LOGSDON; KARLEN, 2004; REICHERT et al., 2007), fornecendo uma visão geral do estado do espaço poroso do solo, além de ser capaz de caracterizar os efeitos do manejo do solo tão bem quanto propriedades intrínsecas do solo, como a matéria orgânica ou a textura (SILVA et al., 1997). A densidade do solo faz parte dos fatores que afetam indiretamente o crescimento das plantas (LETEY, 1985), sendo que os valores de densidade crítica, a partir do qual o crescimento das raízes das plantas é reduzido ou impedido, variam de acordo com a textura do solo. Segundo Reichert et al. (2003) a densidade crítica para solos franco-arenosos está entre 1,70 a 1,80 $Mg\ m^{-3}$, para solos franco-argilosos entre 1,40 a 1,50 $Mg\ m^{-3}$ e 1,30 a 1,40 $Mg\ m^{-3}$ para solos argilosos, enquanto que Reynolds et al. (2007) sugere uma faixa mais ampla para solos argilosos, de 0,9 a 1,20 $Mg\ m^{-3}$.

O comportamento da densidade do solo é altamente influenciado pelo método de manejo adotado. Os resultados encontrados na literatura têm confirmado a tendência de maiores valores de D_s no sistema plantio direto em relação ao sistema convencional, devido à reduzida mobilização do solo no SPD, onde a camada compactada se encontra principalmente na

profundidade de 0 a 20 cm. Tormena et al. (2002) compararam a D_s em três sistemas de manejo, convencional, preparo mínimo e plantio direto, e observaram que a densidade do solo foi maior no SPD, em virtude do efeito cumulativo do tráfego de máquinas e ausência de mobilização mecânica do solo. De Maria et al. (1999) encontraram aumento de densidade na camada de 0,10-0,20 m em SPD. Costa et al. (2003) analisaram as propriedades físicas de um solo sob sistema plantio direto por 21 anos, e constataram que houve um aumento da densidade na profundidade de 0,0-0,05 m, causado pelo trânsito de máquinas e adensamento natural. Czyż e Dexter (2009) detectaram maior valor de D_s na camada 0,10-0,20 m em área manejada sob SPD do que em sistema de manejo convencional e preparo reduzido, porém após sete anos a densidade apresentou redução, devido ao acúmulo de matéria orgânica ao longo do tempo.

A compactação é caracterizada pela redução de volume de solo, e sendo a densidade do solo uma propriedade expressa pela relação massa/volume, ela constitui em um parâmetro prático para detectar a ocorrência da compactação. Entretanto, a densidade sofre grande influência da textura, o que gera a dificuldade de comparação entre solos com texturas contrastantes, pois um determinado valor de densidade que indique a existência de compactação em um solo pode variar entre as diferentes classes texturais.

O grau de compactação foi criado com o objetivo de ser um parâmetro simples o suficiente para ser utilizado nos experimentos de campo, e para relacionar os resultados de estudos de resposta do solo ao tráfego de máquinas com os estudos de produtividade das culturas na presença de compactação. Håkansson (1990) propôs um indicador do estado de compactação do solo, o grau de compactação (G_c). O G_c é expresso em porcentagem (%), e consiste na relação entre a densidade atual do solo e a densidade em estado padrão ou de referência, que corresponde à densidade máxima do solo, permitindo comparar o estado de compactação de vários tipos de solos eliminando a interferência da granulometria.

É um índice que permite comparar o rendimento das culturas utilizando uma mesma base, tanto para solos argilosos quanto para arenosos (CARTER, 1990; COMIA et al., 1994). Estudos indicam que o grau de compactação é um parâmetro que se correlaciona com a resposta de modelos de crescimento radicular, expansão da área foliar e produtividade de culturas em relação à compactação do solo em diversos tipos de solos e condições climáticas (ARVIDSSON; HÅKANSSON, 1991; LIPIEC; HATANO, 2003). A densidade máxima (D_{smax}) ou densidade referência do solo é o estado mais compactado encontrado após a aplicação de uma

pressão de 200 kPa. Segundo Håkansson (1990), este valor representa a pressão exercida pela maioria dos maquinários empregados em operações agrícolas.

Atualmente a D_{smax} é determinada através de dois procedimentos: o teste de Proctor (CARTER, 1990; BEUTLER et al., 2005; KLEIN, 2006) e o ensaio de compressão uniaxial (HÅKANSSON, 1990; LIPIEC et al., 1991; SILVA et al., 1997; SUZUKI et al., 2007). Håkansson (1990) comparou os dois métodos de obtenção da D_{smax} , e verificou que o teste de Proctor atingiu maior estado de compactação do que o ensaio de compressão uniaxial, o que não é indicado, pois uma pressão muito elevada pode gerar variações excessivas entre os solos. O teste de compressão uniaxial é largamente utilizado para estudar as características compressivas em solos agrícolas, além de ter maior facilidade de execução e ser menos trabalhoso do que o teste de Proctor (ARVIDSSON, 1998).

O processo de compactação promove alterações nas propriedades físicas do solo, sendo que pesquisas têm mostrado que o grau de compactação é sensível a estas mudanças. Carter (1990) afirma que o grau de compactação ou compactação relativa é um parâmetro eficiente para detectar a redução da macroporosidade do solo, acarretando uma série de modificações como redução da condutividade hidráulica e da permeabilidade ao ar. Lipiec et al. (1991) encontraram correlação entre o grau de compactação e resistência à penetração e porosidade de aeração. Suzuki et al. (2007) verificaram que o aumento do G_c provocou uma redução linear da macroporosidade, da condutividade hidráulica saturada e aumento da resistência mecânica. De acordo com Lipiec e Håkansson (2000), o grau de compactação é um indicador mais confiável do que a densidade do solo ou a porosidade para avaliar os efeitos biológicos da compactação, pois os limites críticos de resistência à penetração e porosidade de aeração estão relacionados ao grau de compactação e à tensão da água no solo de forma semelhante em vários tipos de solos, por causa da interferência praticamente nula da textura e da matéria orgânica no grau de compactação.

Silva et al. (1997) pesquisaram a influência da textura do solo, matéria orgânica e tipo de manejo na densidade do solo e na densidade relativa¹. Os autores verificaram que a densidade do solo foi fortemente influenciada pelos fatores mencionados, enquanto que o uso da

¹ o termo “densidade relativa” possui o mesmo significado do grau de compactação, sendo que o G_c é expresso em porcentagem (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000).

densidade relativa praticamente eliminou os efeitos da textura e do teor de matéria orgânica, realçando o efeito do tipo de manejo e intensidade do tráfego de máquinas sobre o solo.

O início das pesquisas sobre o grau de compactação teve como foco os solos que eram revolvidos anualmente, mas de acordo com Håkansson e Lipiec (2000) o grau de compactação pode ser um parâmetro útil em estudos em solos sob sistemas conservacionistas como o plantio direto, onde não há mobilização do solo. Entretanto, os autores ressaltam que as relações entre o Gc e o desenvolvimento das plantas em sistemas conservacionistas podem ser diferentes em comparação aos sistemas onde há mobilização do solo, em virtude da melhor continuidade e estabilidade dos macroporos proporcionados pelo sistema plantio direto.

Diversos estudos comprovam a correlação entre o grau de compactação e a produtividade das culturas. Håkansson (1990) utilizou o Gc para verificar o rendimento máximo da cultura da cevada em solos arenosos a argilosos, encontrando valor ótimo de grau de compactação aproximadamente igual a 87% em vários solos da Suécia. Carter (1990) afirma que a faixa de Gc entre 77 a 84% proporcionou uma produção relativa de grãos maior do que 95% em solos canadenses. Na Polônia, a produção de grãos foi prejudicada quando o grau de compactação excedeu o valor de 88% (LIPIEC et al., 1991).

Apesar da comprovada eficácia como indicador da compactação, os estudos sobre o grau de compactação no Brasil tiveram início somente nos últimos 10 anos, principalmente em áreas sob sistema plantio direto. Em pesquisa realizada em um Latossolo Roxo eutrófico no norte do Paraná com cinco níveis de compactação do solo, Torres e Saraiva (1999) observaram que a produtividade da soja foi afetada negativamente a partir de valores de grau de compactação entre 84 a 87%. Beutler et al. (2005) concluíram que a densidade relativa ótima para a cultura da soja em Latossolo Vermelho em casa de vegetação e no campo foi de 0,84 e 0,80 respectivamente. Suzuki (2005) estudando o grau de compactação em sistema plantio direto verificaram que o maior rendimento da soja foi obtido quando o Gc atingiu a média de 82% em Argissolos e 85% para os Latossolos. Klein (2006) utilizou o valor de densidade que apresentou faixa mais ampla do intervalo hídrico ótimo para determinar a densidade relativa ótima, encontrando o valor de 0,71.

Em um Argissolo de textura arenosa, Beutler et al. (2009) constataram decréscimo na produtividade do milho a partir da densidade relativa de 0,89. Porém Reichert et al. (2009) estimaram o grau de compactação utilizando diferentes métodos para obter a densidade máxima,

e observaram que o teste de compressão uniaxial com amostras deformadas foi o que apresentou maior grau de compactação, encontrando os valores de 105% para a soja e 102% para feijão e trigo. Os autores explicam que a aplicação de uma carga baixa na obtenção da densidade máxima pode superestimar o grau de compactação, o que pode levar a uma interpretação errônea da existência de alta compactação. Houve avanços nas pesquisas sobre a eficiência do grau de compactação como um indicador da compactação do solo, porém poucos estudos têm sido realizados sobre a influência no Gc de práticas de mobilização do solo, como a escarificação e a subsolagem.

2.1.3 Efeito da compactação do solo no desenvolvimento das plantas

Segundo Letey (1985) as propriedades físicas do solo que afetam diretamente o crescimento das plantas são água, aeração, temperatura e resistência mecânica, enquanto que a estrutura, textura, densidade do solo, estabilidade de agregados e distribuição do tamanho de poros constituem nos fatores indiretos. Desta forma, a degradação do solo provocada pelo processo de compactação reflete no desenvolvimento das plantas.

A disponibilidade de água para as plantas é medida pelo potencial da água no solo, determinado pelo tamanho dos poros, que se refere ao estado de energia que a água está retida no solo, e conseqüentemente a energia necessária para a água ser absorvida do solo pelas plantas, (LETEY, 1985). Em baixas tensões, uma amostra compactada retém menos água do que em amostras que não estão compactadas. A influência da compactação no potencial da água se traduz em mudanças na condutividade hidráulica do solo, afetando a infiltração, evaporação, redistribuição e ascensão capilar da água. Estudando o comportamento da porosidade em solo argiloso submetido ao tráfego de máquinas em diferentes umidades, Logsdon et al. (1992) observaram que a compactação diminui a condutividade hidráulica do solo.

A aeração consiste na adequada troca de gases entre a raiz e a atmosfera é necessária para que a planta atinja a atividade metabólica ótima, e é diretamente influenciada pela porosidade de aeração. Durante o processo de compactação, a maioria dos poros preenchidos com ar desaparece e são substituídos por poros menores que retém água, reduzindo a taxa de difusão de oxigênio (BOONE; VEEN, 1994). Silva et al. (2004) analisaram o desenvolvimento de plantas em sistema plantio direto e convencional, e verificaram que o crescimento de plantas apresentou

relação positiva e não-linear com a porosidade de aeração, e que a influência do método de manejo do solo no crescimento das plantas aumentou com o decréscimo da porosidade de aeração, e que em valores de porosidade de aeração relativamente altos o efeito do manejo foi o contrário. Os autores afirmam que este comportamento pode ser relacionado às diferenças na distribuição do tamanho de poros, o qual por sua vez é afetado pelos sistemas de manejo do solo. A temperatura do solo determina a germinação e emergência das plantas, sendo um importante fator na produção das culturas. O regime térmico do solo depende da sua cobertura superficial, com vegetação ou resíduos, e do conteúdo de água, além da intensidade e duração da radiação solar (COSTA et al., 2003).

A resistência à penetração (RP) consiste na resistência oferecida pela matriz do solo contra a deformação por uma raiz em crescimento (PANAYIOTOPOULOS et al., 1994). A RP é influenciada principalmente pela umidade e densidade, e em geral ela aumenta à medida que a umidade do solo diminui, devido ao aumento da resistência de fricção entre as partículas do solo e entre as partículas e as hastas dos penetrômetros (IJIMA; KATO, 2007). Em solos com alto grau de compactação, Bergamin et al. (2010) verificaram reduções nos valores de diâmetro, comprimento e superfície radicular do milho foram observadas reduções nos valores de diâmetro, comprimento e superfície radicular. Pesquisas têm mostrado que solos que apresentam altos valores de RP induzem o envio de mensagens hormonais originadas das raízes das plantas até a parte aérea, causando redução do crescimento das folhas (PASSIOURA, 2002).

A presença de camadas compactadas pode modificar o comportamento das raízes das plantas, devido à alteração dos fluxos e armazenamento de oxigênio e calor, podendo afetar as pressões que as raízes exercem contra a matriz do solo (TAYLOR; BRAR, 1991). De acordo com Lipiec et al. (2003) a compactação do solo resulta em diminuição do tamanho das raízes, se concentrando na camada mais superficial, com baixo volume de raízes em profundidade. Materechera et al. (1992), afirma que o diâmetro das raízes aumentaram devido o aumento da resistência mecânica do solo, e para se adaptar às mudanças na estrutura do solo são induzidas nas plantas modificações morfológicas e fisiológicas, como diminuição do diâmetro das raízes e proliferação de raízes laterais. Em solos compactados com altos valores de densidade do solo pode ocorrer a redução da taxa de alongação de raízes seminais e do número de raízes primárias (KUCHENBUCH; INGRAM, 2004).

Os resultados das pesquisas que relacionam a compactação do solo com a produtividade e rendimento das culturas são divergentes. Voorhees et al. (1989) pesquisaram o efeito da compactação no crescimento e produtividade do milho, e concluíram que o aumento da densidade do solo prejudicou o rendimento da cultura. Secco et al. (2009) concluíram que o efeito da compactação presente na área estudada reduziu o rendimento de grãos na cultura do milho e do trigo, mas não o rendimento da soja. De acordo com Beutler et al. (2004), houve redução do rendimento do arroz de sequeiro e da soja devido os efeitos da compactação, como aumento da resistência à penetração, densidade e microporosidade do solo. Entretanto, Nogueira e Manfredini (1983) afirmam que a presença da camada compactada em si não é um fator restritivo e que esta compactação poderá ser responsável pela diminuição na produção apenas em condições de deficiência hídrica.

2.1.4 Influência da escarificação sobre os atributos físicos dos solos

No sistema plantio direto, embora a mobilização do solo no plantio direto esteja restrita à linha de semeadura, ocorre tráfego de máquinas ao longo de toda a área (TORMENA et al., 1998). Em SPD frequentemente nota-se a presença de uma camada compactada, principalmente nas áreas onde o sistema está implantado por longos períodos de tempo, devido o contínuo tráfego de máquinas aliado à ausência de revolvimento do solo que favorece a reconsolidação natural das partículas (BENJAMIN, 1993; CARTER et al., 1999). Geralmente a camada compactada apresenta-se em superfície, nos primeiros 20 cm (DE MARIA et al., 1999; TORMENA et al., 2002; SECCO et al., 2009).

Como alternativa para reduzir a compactação superficial em SPD, tem sido praticada a escarificação do solo. Seu princípio de rompimento do solo é a propagação das trincas, onde o solo é rompido nas suas linhas de fraquezas naturais ou através das interfaces dos seus agregados, sendo chamado de rompimento tridimensional do solo em blocos (LANÇAS, 2002). Este tipo de mobilização é menos agressiva do que as realizadas pelos arados e grades, pois não provoca a inversão do solo, apresentando vantagens como menor desagregação do solo e manutenção de resíduos em superfície.

Os resultados encontrados na literatura sugerem que a escarificação pode proporcionar efeitos benéficos ou maléficos nas propriedades físicas do solo. Enquanto alguns

autores verificam melhorias em propriedades físico-hídricas do solo, outros afirmam que a escarificação quando realizada em condições inadequadas pode degradar a estrutura do solo. Em Argissolo Vermelho-Amarelo, Abreu et al. (2004) observaram redução da resistência à penetração nos primeiros 7 cm do solo em SPD, mas não encontraram diferenças na densidade do solo entre antes e depois da escarificação. Camara e Klein (2005b) verificaram que o solo escarificado apresentou menores valores de RP e densidade do solo, e maior condutividade hidráulica e infiltração da água em comparação com o plantio direto consolidado. Araújo et al. (2004) observaram incremento na porosidade de aeração em solo escarificado, entretanto na camada de 0,15-0,30 m houve diminuição do intervalo ótimo de tensão de água no solo. Tormena et al. (2004) comparando propriedades físicas em solos sob plantio direto e com escarificação, concluíram que maiores valores de porosidade total e macroporosidade, e redução da D_s . Castro et al. (2010) encontraram maior retenção de água na camada superficial no preparo do solo escarificado sob SPD, entretanto não verificaram diferenças na condutividade hidráulica no solo com e sem mobilização.

Vieira e Klein (2007) não observaram diferenças na densidade do solo após a escarificação, porém houve incremento na condutividade hidráulica saturada e a taxa de infiltração de água. Collares et al. (2008) não encontraram aumento da macroporosidade após a realização da escarificação, porém se mostrou eficiente para reduzir a RP até 0,25 m de profundidade. Xu e Mermoud (2001) verificaram que a descompactação mecânica aumentou a taxa de infiltração da água, devido ao aumento do volume de poros de maior diâmetro ($>50 \mu\text{m}$) na camada mobilizada, aumentando a condutividade hidráulica saturada. Veiga et al. (2008) observaram aumento na porosidade total logo após a escarificação, mas o período de um cultivo foi suficiente para que houvesse redução desses valores, devido à reconsolidação natural do solo. Rosa et al. (2008) verificaram que em solo recém escarificado apresentou maior macroporosidade e menor microporosidade, contudo após um período de dois a quatro anos não foram observados estas diferenças.

Apesar das melhorias que a escarificação oferece nas propriedades físicas do solo, há evidências de que estes efeitos são de curta duração. A densidade do solo (D_s) caracteriza o estado de compactação do solo, e por isso é bastante utilizada na avaliação da duração dos efeitos da escarificação. Em um Latossolo Vermelho Escuro distrófico sob SPD por três anos, Klein (1998) avaliou a densidade do solo em diferentes manejos, concluindo que o efeito da

descompactação persistiu somente por um ano, devido ao adensamento natural ou pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas sobre a superfície do solo com umidades elevadas. O autor afirma que após certo período o solo volta a passar por nova compactação, podendo chegar a níveis semelhantes ao solo não mobilizado, o que seria uma tendência em áreas sob sistema plantio direto. Segundo Busscher et al. (1995), os efeitos residuais da descompactação mecânica não foram detectados depois de três anos, mesmo período relatado por Evans et al. (1996) para que não fossem mais observados efeitos da descompactação na densidade do solo. Xu e Mermoud (2001) verificaram que houve tendência de aumento da densidade em solo escarificado após dois meses, em razão da deformação do solo causada pelos ciclos de umedecimento e secagem, impacto das gotas de chuva e a conseqüente desintegração dos agregados.

Em trabalho semelhante ao do presente estudo, Reichert et al. (2009) avaliaram a influência dos sistemas de manejo na densidade do solo em solo sob SPD por dez anos, plantio em área recentemente escarificada recente e em área após um ano da escarificação. Os autores verificaram ao final do experimento que houve redução inicial da D_s causada pela escarificação, entretanto, os seus efeitos tenderam a desaparecer em pouco tempo, pois os valores de densidade um ano após a escarificação foram maiores em relação à área escarificada recentemente, como conseqüência da desestruturação do solo causada pela mobilização, fazendo com que os agregados sejam menos resistentes às cargas aplicadas.

Vários processos influenciam a permanência dos efeitos da escarificação, como o estado de compactação inicial, a umidade do solo no momento da operação, textura do solo e conteúdo de matéria orgânica. Entretanto, o processo que mais contribui para a efemeridade dos efeitos da escarificação é a reconsolidação, que é o processo pelo qual o solo se recupera após uma intervenção externa, voltando à sua condição original (EVANS et al., 1996; NICOLOSO et al., 2008). Busscher et al. (2002) relacionaram o volume e a intensidade de precipitação com a persistência dos efeitos da escarificação, onde a tendência de maior reconsolidação do solo ocorre em anos mais chuvosos.

Embora a escarificação proporcione benefícios às propriedades físicas do solo, estudos mostram que nem sempre essas melhorias se refletem em aumento na produtividade das culturas. Klein e Camara (2007) não encontraram diferenças na produtividade de soja em solo escarificado. Secco et al. (2009) verificaram que a escarificação aumentou o rendimento da cultura do milho e do trigo, porém a escarificação não provocou mudanças no rendimento da

soja. Mahl et al. (2008) não observaram influência da escarificação na produtividade do milho. Collares et al. (2008) afirmaram que a escarificação não afetou significativamente a produtividade do feijão, e que em relação a cultura do trigo, houve tendência de diminuição da produtividade em solo escarificado em comparação com o plantio direto consolidado. Muitas vezes a escarificação não surte em aumento da produtividade em sistema plantio direto, pois em solos manejados sob este sistema é comum a ocorrência de grande quantidade de bioporos formados por microrganismos, os quais são interconectados e de maior diâmetro, o que melhora a condutividade da água e do ar, compensando assim valores de densidade do solo acima do recomendado.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Características gerais da área de estudo

A pesquisa foi conduzida na Fazenda Escola “Capão da Onça”, unidade pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa, localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná (Figura 1). A localização geográfica do experimento está situada nas coordenadas 25°05'52” S e 50°02'43” O, com altitude média de 1.080 metros e declividade entre 3 a 8%.

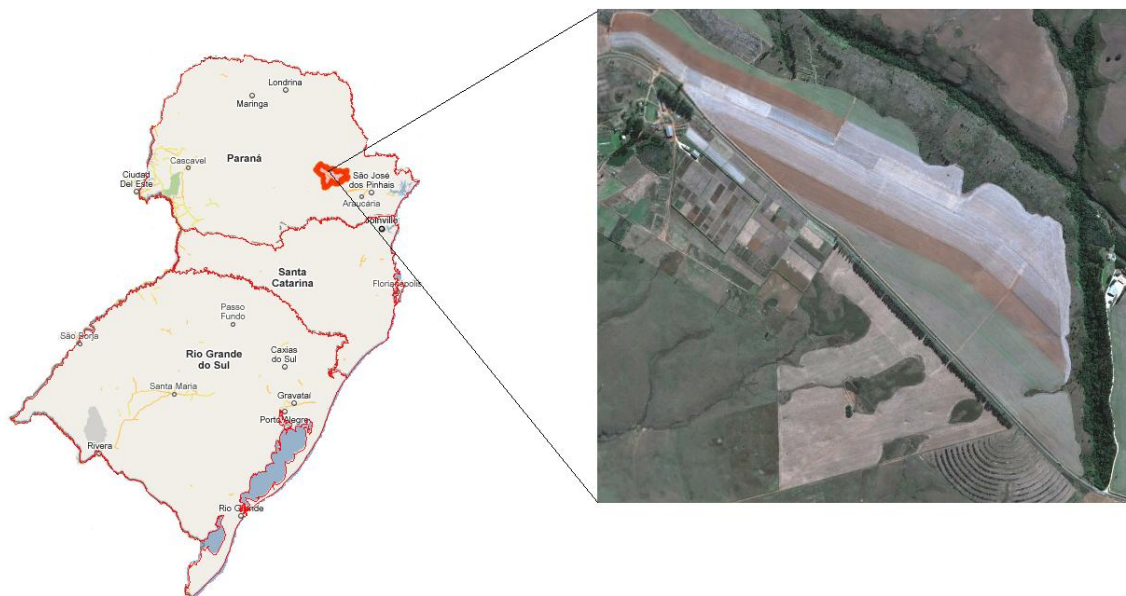


Figura 1 - Localização espacial da área do experimento em Ponta Grossa/PR

O sistema plantio direto vem sendo utilizado no local do experimento por mais de dezesseis anos, iniciando com rotação de milho (*Zea mays* L.) e soja (*Glycine max* L.) no período primavera/verão, e trigo (*Triticum aestivum* L.) e consórcio aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) + ervilhaca (*Vicia sativa* L.), no outono/inverno. A semeadura das culturas de primavera/verão foi realizada com hastes sulcadora a 0,04 m de profundidade para a colocação da semente e a 0,10 m para a deposição do adubo, enquanto que a semeadura das culturas de outono/inverno foi executada com disco duplo a 0,03 m de profundidade.

2.2.2 Solos e clima

As classes de solo predominantes na região são os Latossolos Vermelhos distróficos e Cambissolos Háplicos distróficos provenientes da alteração de folhelhos do Período Paleozóico, e o solo da área em estudo foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico, o qual é originado de retrabalhamento de folhelhos e arenitos das Formações Ponta Grossa e Furnas (EMBRAPA/IAPAR, 2008). De acordo com a Tabela 1 o solo da área em estudo está classificado como da classe textural argilosa (SANTOS et al., 2005). O teor de argila praticamente se mantém constante com pequeno aumento em profundidade, indicando uma distribuição textural uniforme, característica dos Latossolos (EMBRAPA, 2006). A densidade de

partículas é menor na camada superficial do solo devido à maior influência do conteúdo de matéria orgânica.

Tabela 1 - Distribuição do tamanho de partículas e densidade de partículas nas camadas avaliadas

Camada m	Argila	Silte	Areia	Dp
	-----g kg ⁻¹ -----			g cm ⁻³
0,0-0,10	506,2	52,4	441,4	2,54
0,10-0,20	518,4	53,3	428,3	2,58
0,20-0,30	512,3	54,3	433,4	2,59
0,30-0,40	520,5	54,4	425,1	2,60

Dp: densidade de partículas.

A região apresenta clima mesotérmico, subtropical úmido do tipo Cfb segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 18,7°C (IAPAR, 2000). A média de precipitação anual é de 1.600 mm, sendo que o período que ocorre a maior quantidade de chuvas é a época do verão, nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, e picos de chuva nos meses de julho, setembro e outubro de 2009 (Figura 2).

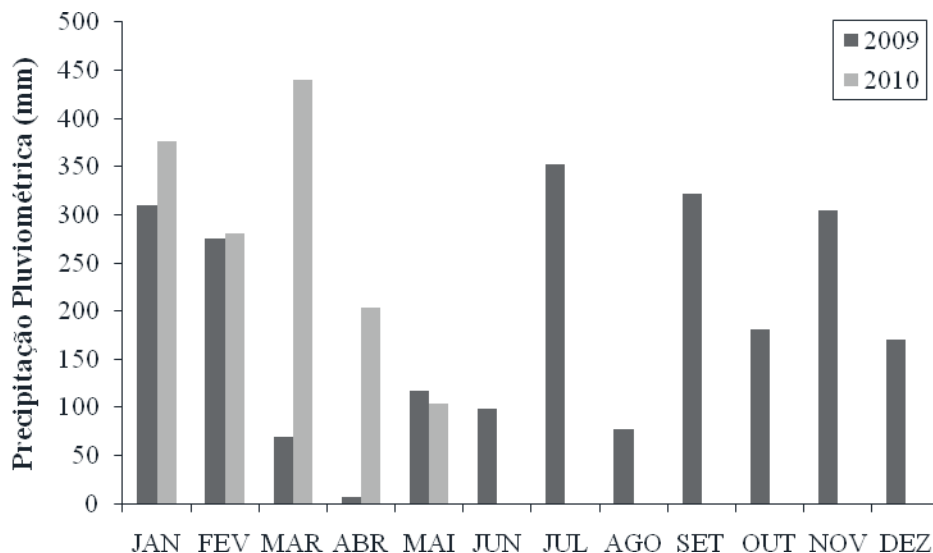


Figura 2 - Dados de precipitação pluviométrica do período de avaliação do experimento em Ponta Grossa

Fonte: Estação meteorológica da Fazenda Escola “Capão da Onça” – UEPG

2.2.3 Delineamento experimental e amostragem

Na estação experimental onde o presente estudo foi realizado existem vários experimentos instalados, onde estão sendo conduzidos diversos estudos. Uma parte da área com 6000 m² foi selecionada para monitoramento da variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação. O experimento foi conduzido em quatro parcelas com dimensões de 9 x 50 m, totalizando 450 m². As parcelas foram escarificadas em maio de 2009, na qual foi utilizado um subsolador tipo Asa Laser, modelo Jumbo Matic (Figura 3), que foi acoplado ao sistema de acionamento hidráulico do trator, dois dias antes da semeadura da cultura de inverno. O subsolador dispõe de cinco hastes (três na barra dianteira e duas na traseira) de formato parabólico e ponteira em cinzel, com espaçamento entre hastes de 0,2 m e ângulo de ataque de 22°. Apesar de ter sido utilizado um subsolador, a profundidade de operação regulada foi de 0,25 m, o que caracteriza uma operação de escarificação. No momento da escarificação a umidade média das parcelas era de 29,49%, correspondendo a uma umidade abaixo da capacidade de campo, que era de 38% no momento da escarificação.



Figura 3 – Subsolador utilizado para a operação de mobilização do solo

As épocas estudadas foram: i) antes da escarificação (PD); ii) imediatamente após a escarificação (EC); iii) seis meses (EC6M); iv) doze meses após a escarificação (EC12M), e as profundidades coletadas foram de 0,0-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m. O estudo consistiu da análise da variação da densidade do solo e do grau de compactação dentro de um período de um ano. Para cada época estudada, três pontos por parcela foram selecionados (Figura 4), e em cada ponto foi coletada uma amostra em cada uma das quatro profundidades referidas, perfazendo um total de 48 amostras por época, o que totaliza 192 amostras.



Figura 4 – Esquema da coleta das amostras na área experimental

Fonte: Google Earth (2009)

No momento de coleta das amostras indeformadas foi utilizado um amostrador eletro-mecânico (Figura 5), que permite a coleta de amostras de solos sem aplicação de golpes, com velocidade constante de 2 mm s^{-1} . A descrição completa do equipamento pode ser consultada em Figueiredo (2010).



Figura 5 - Introdução do anel volumétrico no solo com o amostrador eletrônico (a); retirada da amostra após o final do curso do equipamento (b)

2.2.4 Análises realizadas

2.2.4.1 Textura do solo e densidade de partículas

A análise granulométrica foi feita pelo método do densímetro (GEE; BAUDER, 1986), sendo utilizada uma solução com hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio como dispersante químico.

A densidade de partículas foi obtida pelo método do picnômetro de gás hélio, (ACCUPYC 1330, Micromeritics Instrument Corporation®). As amostras de solo foram passadas em peneira com abertura de 2 mm, pesadas em alíquotas de aproximadamente 6 g de solo seco em uma cápsula de metal, e em seguida foram feitas as leituras no picnômetro.

2.2.4.2 Densidade do solo

Para determinar a densidade do solo, as 48 amostras obtidas após cada época de amostragem foram coletadas em anéis volumétricos de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro, de acordo com a metodologia de Blake e Hartge (1986). No laboratório foram retiradas as sobras de solo das extremidades, e então as amostras foram pesadas, colocadas em estufa para secar à 105°C por 24 horas, sendo obtido o peso do solo seco em estufa. A densidade do solo foi calculada pela seguinte fórmula:

$$D_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Onde D_s é a densidade do solo em $Mg\ m^{-3}$; M_s é a massa do solo seco em Mg; e V_s é o volume do solo no anel em m^{-3} .

2.2.4.3 Determinação da Densidade do solo máxima e grau de compactação

Para calcular o grau de compactação (%) ou densidade relativa, foi determinada a densidade do solo máxima ($D_{s_{max}}$). Anéis de 7 cm de diâmetro por 2,5 cm de altura foram preenchidos com solo passado por peneira de malha de 2 mm, com três repetições por

profundidade. Para a realização deste ensaio foi utilizado um consolidômetro (Figura 6), o qual faz a aplicação da pressão através de carga pneumática (FIGUEIREDO, 2010).

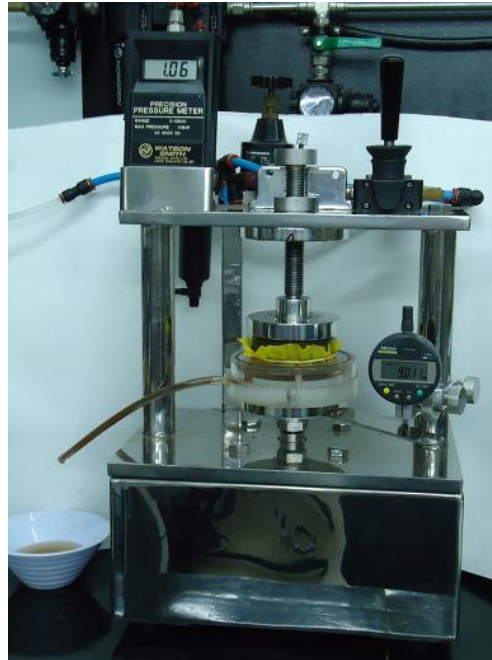


Figura 6 - Consolidômetro pneumático utilizado para o ensaio de compressão uniaxial

As amostras foram saturadas com água por 24 horas e posteriormente submetidas ao ensaio de compressão uniaxial à pressão de 200 kPa, seguindo uma adaptação da metodologia descrita por Håkansson (1990). O teste de compressão uniaxial foi realizado quando as amostras atingiram o estado de saturação. O tempo de compressão adotado para cada amostra foi de 10 minutos, tempo suficiente para que mais de 99% da compactação máxima fosse alcançada (SILVA et al., 2000). Ao final do ensaio as amostras foram levadas para a estufa a 105°C para posterior pesagem do solo seco. A densidade do solo máxima foi calculada a partir da diferença entre a densidade do solo antes e após a compressão, através das leituras obtidas pelo consolidômetro.

A partir dos valores de densidade máxima do solo, o grau de compactação (GC) foi calculado com a seguinte fórmula:

$$GC = \frac{D_s}{D_{s_{\max}}} \times 100 \quad (1)$$

Sendo D_s a densidade do solo e $D_{s_{\max}}$ a densidade máxima do solo obtida após a aplicação da pressão de 200 kPa.

2.2.5 Análise estatística

Em virtude da natureza do experimento, o intervalo de confiança da média foi adotado como critério estatístico para discriminação e comparação dos efeitos da escarificação na densidade e no grau de compactação do solo ao longo do tempo. Considerou-se que houve diferenças significativas entre as épocas quando não houve sobreposição dos limites superior e inferior. O intervalo de confiança estabelece os valores nos quais a média dos valores do conjunto de dados está localizada, sendo um método eficiente e confiável na interpretação de diferenças significativas (PAYTON et al., 2000).

2.3 Resultados e discussão

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva para a densidade do solo nos diferentes períodos e profundidades do solo. Os valores de mínimos e máximos de D_s enquadram-se dentro da faixa considerada normal para solos de textura argilosa (BRADY; WEIL, 2007) e não há valores discrepantes de D_s no conjunto de dados (Tabela 2).

Tabela 2 - Momentos estatísticos da densidade do solo (Ds) para diferentes períodos e profundidades do solo avaliados (N=12)

	Antes da escarificação	Depois da escarificação	6 meses após a escarificação	12 meses após a escarificação
0,0-0,10 m				
Mínimo	1,02	0,92	1,08	1,07
Média	1,17	1,02	1,23	1,20
Máximo	1,32	1,17	1,35	1,38
DP	0,089	0,077	0,088	0,090
CV (%)	7,66	7,56	7,21	7,55
0,10-0,20 m				
Mínimo	1,10	1,07	1,28	1,13
Média	1,24	1,16	1,32	1,26
Máximo	1,37	1,25	1,40	1,33
DP	0,071	0,047	0,047	0,055
CV (%)	5,76	4,08	3,58	4,40
0,20-0,30 m				
Mínimo	1,07	1,12	1,20	1,12
Média	1,20	1,19	1,26	1,23
Máximo	1,31	1,27	1,32	1,33
DP	0,070	0,051	0,034	0,063
CV (%)	5,83	4,26	2,68	5,11
0,30-0,40 m				
Mínimo	0,95	1,02	1,14	1,05
Média	1,06	1,13	1,24	1,19
Máximo	1,12	1,17	1,35	1,26
DP	0,050	0,044	0,063	0,070
CV (%)	4,73	3,96	5,07	5,95

DP: desvio-padrão; CV: coeficiente de variação.

Segundo Warrick (1998), a densidade do solo é um atributo que apresenta baixa variabilidade e um coeficiente de variação (CV) inferior a 15%, o que foi corroborado pelos resultados (Tabela 2). Destaca-se que a camada superficial (0-10 cm) apresentou maior CV em virtude de ser a camada mais intensamente explorada pelo sistema radicular das plantas, além de sofrer influência dos fatores de manejo adotados (IMHOFF et al., 2000; SILVA et al., 1997).

Nas demais profundidades (10-20 cm; 20-30 cm; 30-40 cm) o desvio-padrão e o coeficiente de variação indicaram menor dispersão dos dados. Segundo Silveira (1999), a baixa variabilidade da densidade do solo em sistema plantio direto deve-se ao seu estado de maior consolidação, sendo mais resistente às deformações em relação aos sistemas de preparo com revolvimento de solo.

2.3.1 Densidade do solo (Ds) antes da escarificação

Os valores médios da Ds no perfil de solo estudado antes da escarificação são exibidos na Figura 7. Na camada 0,0-0,10 m a Ds apresentou valor médio de $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$. Já para a camada 0,10-0,20 m observou-se incremento de Ds ($1,24 \text{ Mg m}^{-3}$) e para as camadas 0,20-0,30 m e 30-0,40 m ocorreu uma redução da mesma, com valores de $1,20 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$ respectivamente. Não foram encontrados valores de Ds limitantes ao desenvolvimento das plantas, pois segundo Reichert et al. (2003) o limite de Ds considerado crítico para o crescimento das raízes em solos argilosos situa-se entre $1,30$ e $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$. Na mesma área experimental, Cavalieri et al. (2009) obtiveram resultados similares, verificando Ds inicialmente menor, com um aumento na camada de 0,10-0,20 m e, novamente, uma redução para as camadas mais profundas. Os autores afirmam que esta compactação sub-superficial pode ter origem no sistema convencional que era utilizado antes da adoção do plantio direto. O grau de compactação do solo pode ser determinado pela remoção ou não de camadas compactadas resultantes de manejos anteriores (TORMENA et al., 1998).

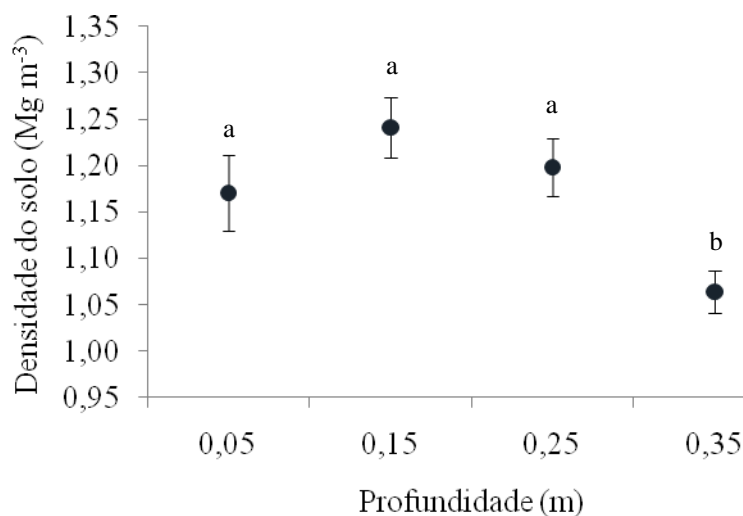


Figura 7 - Valores médios e intervalos de confiança da média para a densidade do solo antes da escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%) nas diferentes profundidades avaliadas

Diversos autores têm constatado um aumento da densidade do solo em solos sob sistema plantio direto, principalmente nas profundidades de 10 até 30 cm. Esse incremento da D_s pode ser atribuído à ausência de mobilização mecânica do solo, tendo como consequência a acomodação natural do solo e ao acúmulo das pressões exercidas pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas sobre a superfície do solo ao longo do tempo (LOGSDON et al., 1999; TORMENA et al., 2002; REYNOLDS et al., 2007; CAVALIERI et al., 2009).

Embora a densidade do solo na camada 0,10-0,20 m esteja no limite do intervalo ideal para solos de textura média a argilosa (entre 0,9 e 1,2 $Mg\ m^{-3}$) para o máximo rendimento das culturas (REYNOLDS et al., 2007), não há registros de queda na produtividade da área estudada, onde a média de produtividade da soja foi de 3.155,68 kg/ha e do milho foi 12.860,25 kg/ha, indicando que as plantas conseguem ter um desenvolvimento adequado. Longos períodos de utilização de sistemas conservacionistas melhoram o funcionamento do sistema poroso do solo e aumentam a sua estabilidade, pois como os ciclos de umedecimento e secagem são mais intensos e frequentes, a melhoria do sistema poroso pode ser detectada em poucos anos de utilização do sistema, mesmo em camadas mais profundas do solo (HORN, 2004).

Para a camada 0,30-0,40m encontrou-se o menor valor médio de D_s (1,06 $Mg\ m^{-3}$). Baixos valores de densidade do solo em subsuperfície podem ocorrer devido à carga aplicada pelas máquinas não ser suficiente para atingir estas camadas e ao confinamento das cargas aplicadas em camadas mais próximas à superfície do solo. Streck et al. (2004) constataram que a pressão exercida pelo tráfego com uma máquina de 10 Mg não foi suficiente para compactar o solo em maior profundidade. Outro estudo sobre o comportamento da densidade no sistema plantio direto em Latossolo de textura argilosa feito por de Maria et al. (1999) demonstrou uma diminuição da densidade na camada 0,3-0,4 m. Em um Nitossolo Vermelho, Veiga et al. (2008) observaram uma redução de 13% da densidade na camada 0-0,05 m em relação à camada 0,27-0,32 m.

A densidade do solo crítica (D_{sc}) foi definida por Silva et al. (1994) como sendo o valor de D_s a partir do qual ocorre degradação da estrutura do solo e consequente restrição ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. A D_{sc} corresponde a D_s em que o intervalo hídrico ótimo (IHO) é igual a zero. Utilizando o conceito do intervalo hídrico ótimo (IHO) em solo de classe textural similar, Tormena et al. (1998) encontraram o valor de densidade do solo crítica (D_{sc}) igual a 1,28 $Mg\ m^{-3}$. Tormena et al. (2008) também utilizaram o índice S para

avaliar a qualidade estrutural de um solo sob SPD e verificaram que o S diminuía de acordo com o aumento da D_s , o que foi atribuído ao efeito da compactação na redução do volume dos macroporos. Os autores constataram que a D_{sc} , valor de D_s onde o valor de S é igual a 0,035 foi igual a $1,16 \text{ Mg m}^{-3}$. Em diferentes profundidades do solo, Cavalieri et al. (2009) verificaram que o índice S foi negativamente correlacionado com a densidade do solo e a D_{sc} estimada foi igual a $1,27 \text{ Mg m}^{-3}$. Comparando com o presente estudo, o maior valor de D_s ($1,24 \text{ Mg m}^{-3}$) se encontra abaixo do encontrado por Cavalieri et al. (2009), porém mais propriedades físicas devem ser avaliadas como a resistência à penetração, condutividade hidráulica e permeabilidade ao ar para caracterizar de forma completa o estado da qualidade física deste solo.

2.3.2 Variação da D_s após a escarificação

Os valores médios de D_s para as diferentes camadas de solo estudadas e períodos avaliados são apresentados na Figura 8. Verifica-se que, para a camada 0,0-0,10 m, em relação à condição original do solo ($D_s = 1,17 \text{ Mg m}^{-3}$), houve uma redução significativa da densidade do solo logo após a escarificação ($D_s = 1,02 \text{ Mg m}^{-3}$). Após seis meses da escarificação constatou-se um aumento de 20% na densidade, mantendo-se praticamente constante após doze meses, com uma leve queda, o que mostra uma tendência de estabilização. De forma semelhante aos resultados do presente estudo, Xu e Mermoud (2001) verificaram que na camada de 0,0-0,10 m houve uma diminuição significativa da densidade 10 dias após a escarificação em relação ao plantio direto não alterado, sendo que após 3 meses verificaram tendência de aumento da densidade, em razão da deformação do solo pelos ciclos de umedecimento e secagem e desintegração de agregados.

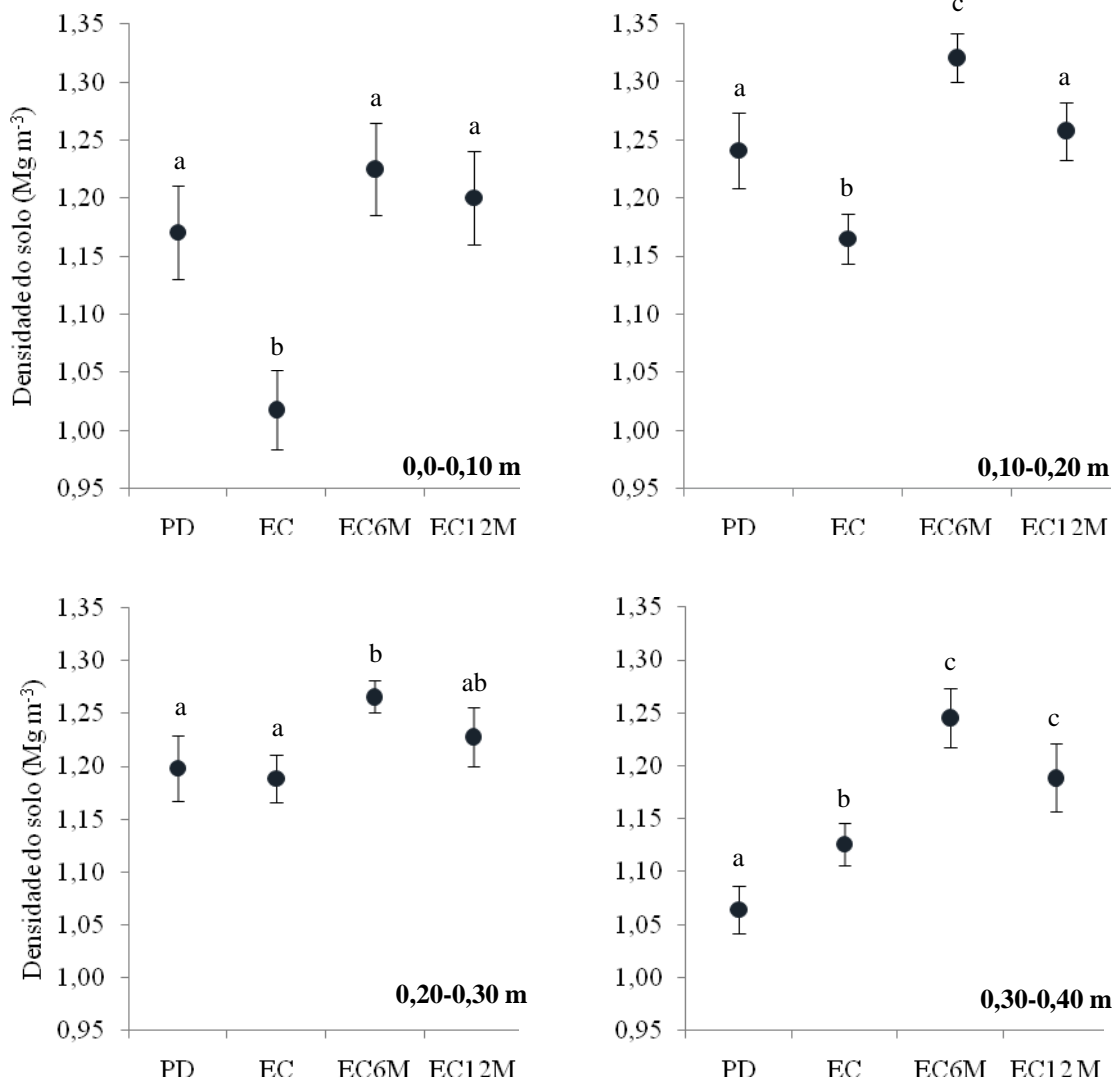


Figura 8 - Valores médios e intervalos de confiança da média para a densidade do solo das épocas em estudo. PD: Plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; EC6M: 6 meses após a escarificação; EC12M: 12 meses após a escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%)

Para a camada de 0,10-0,20 m (Figura 8) também ocorreu redução significativa da densidade do solo logo após a escarificação ($D_s=1,16 \text{ Mg m}^{-3}$) e um considerável aumento da mesma seis meses após a escarificação ($D_s=1,32 \text{ Mg m}^{-3}$). Entretanto, após doze meses observou-se uma diminuição significativa da densidade para $1,26 \text{ Mg m}^{-3}$, valor semelhante ao plantio direto não mobilizado ($D_s=1,24 \text{ Mg m}^{-3}$). Valores de D_s a partir de $1,25 \text{ Mg m}^{-3}$ começam a limitar a produção das culturas em solos com textura argilosa devido à redução da aeração do

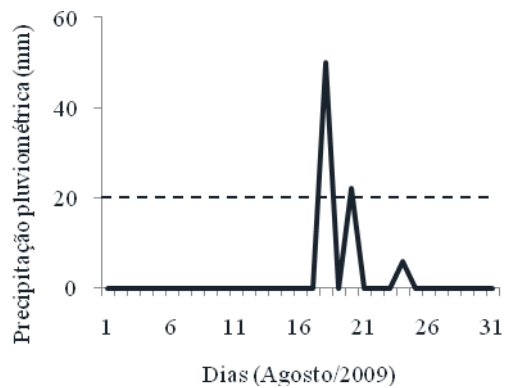
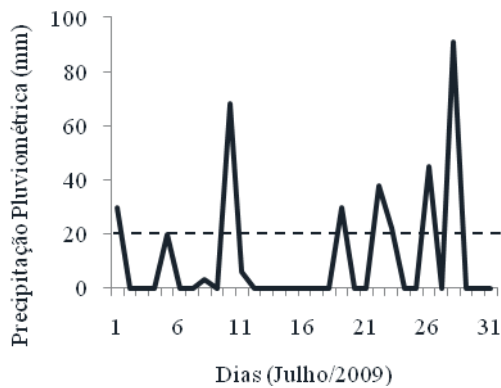
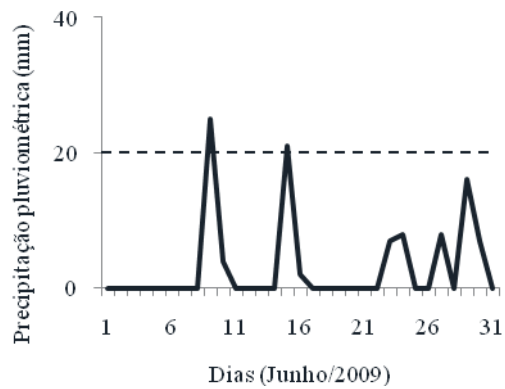
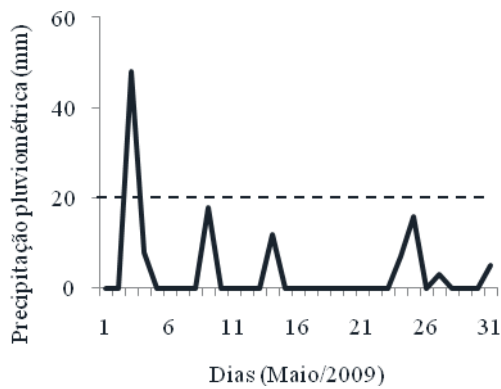
solo e fluxo de água e solutos (CARTER, 1988; REYNOLDS et al., 2009). Os ciclos de umedecimento e secagem são mais intensos nas camadas mais superficiais do solo (até 30 cm), devido à concentração da atividade do sistema radicular das plantas e maior quantidade de matéria orgânica (HORN; DEXTER, 1989), o que confere maior resiliência, fazendo com que o solo se recupere mais rapidamente de um distúrbio. Processos biológicos tais como penetração de raízes e atividade de microrganismos exercem um importante efeito regenerativo da compactação do solo, em razão de ocorrer maior intensidade de atuação desses processos nas camadas superficiais do solo (GREGORY et al., 2007).

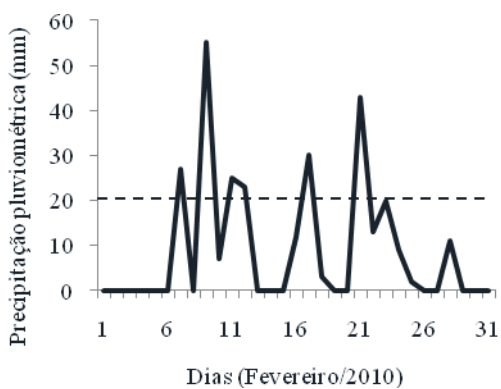
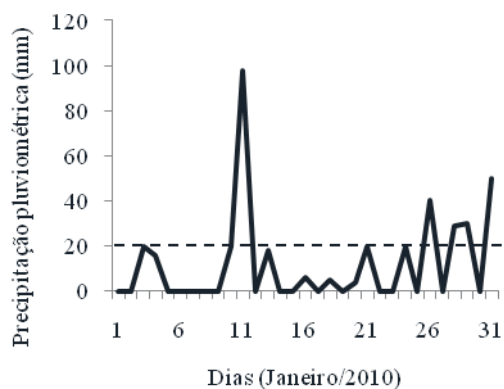
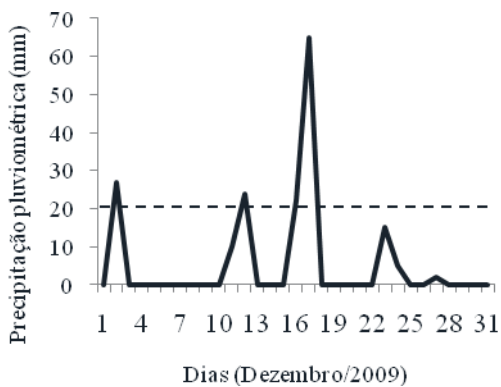
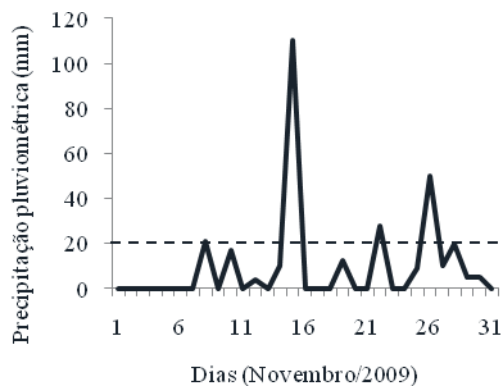
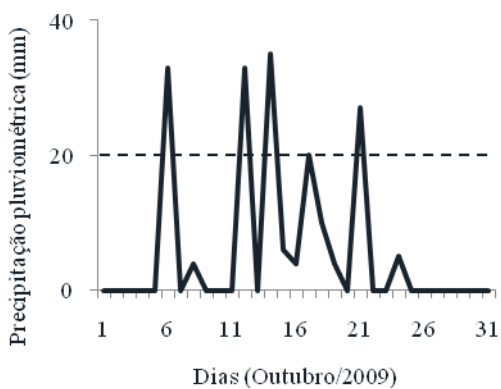
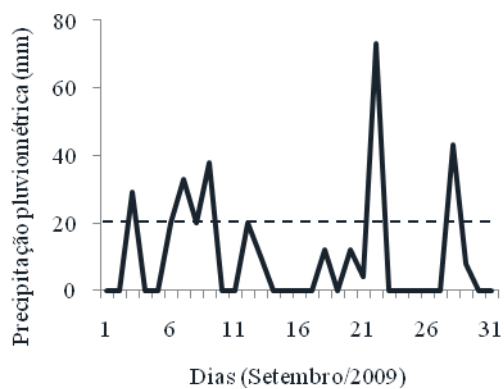
Em 0,20-0,30 m, a densidade do solo depois da escarificação não diferiu estatisticamente do valor da D_s antes da mobilização. É importante ressaltar que a densidade praticamente não se alterou, permanecendo constante mesmo após a descompactação. Este resultado indica que a escarificação realizada na área não mobilizou a camada 0,20-0,30 m. Depois de seis meses da escarificação, a densidade teve um aumento significativo, seguido de uma redução aos doze meses, repetindo o padrão das profundidades anteriores. Araújo et al. (2004) verificaram que, após a escarificação, houve perda da qualidade estrutural do solo, aumento da resistência à penetração e efeitos negativos na estrutura do solo.

O comportamento observado pode ser atribuído ao efeito da resiliência do solo estudado, de modo que o mesmo reagiria após a aplicação de uma pressão, procurando retornar ao seu estado original. A maior resiliência de solos sob sistema plantio direto pode ser atribuída à menor mobilização do solo, o que favorece o acúmulo de matéria orgânica (MO) nas camadas superficiais do solo (BLANCO-CANQUI et al., 2009). A influência da MO na compactação do solo pode ser compreendida pelo seguinte processo: a matéria orgânica aumenta a resistência do solo à deformação aumentando a elasticidade e o relaxamento da matriz do solo, devido à natureza elástica e solta das partículas orgânicas. Desta forma, a MO reduz a densidade do solo em geral através do “efeito diluição”, por meio da influência da baixa densidade das partículas orgânicas em relação às partículas minerais. Compostos orgânicos de alto peso molecular contribuem para a ligação entre partículas orgânicas e minerais dentro dos macro e microagregados, aumentando a resiliência contra a compactação (BLANCO-CANQUI et al., 2010).

A evolução da densidade do solo após a escarificação pode ser explicada devido à influência dos ciclos de umedecimento e secagem. Os dados de precipitação pluviométrica diária

durante o período do experimento podem ser observados na Figura 9. Foi considerado como um ciclo de umedecimento uma chuva de mais de 20 mm e a secagem após três dias sem precipitação. Verifica-se que no período entre a escarificação realizada em maio de 2009 até a próxima amostragem, realizada em outubro de 2009, ocorreram aproximadamente dez ciclos de umedecimento e secagem, e na última amostragem, em maio de 2010, foram no total vinte e cinco ciclos. A intensidade e frequência dos ciclos de umedecimento e secagem podem amenizar os efeitos da compactação, principalmente nas camadas mais superficiais (HAKANSSON, 2005).





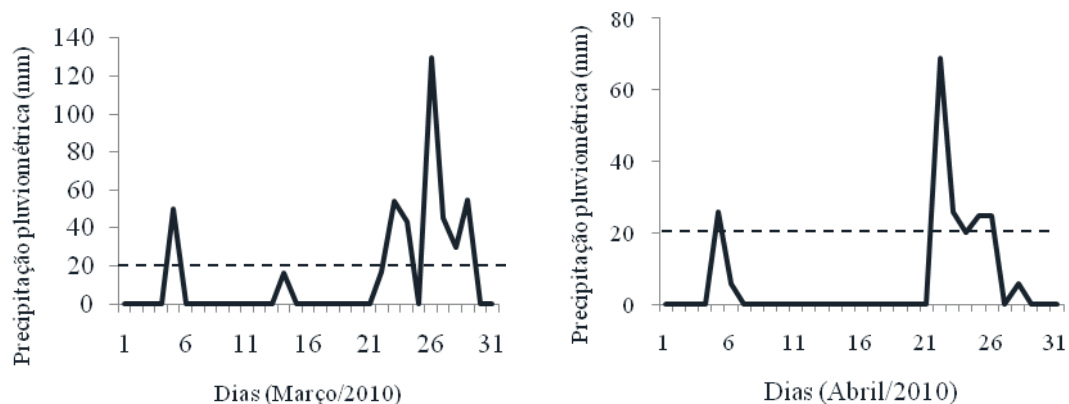


Figura 9 – Precipitação pluviométrica diária durante o período do experimento. Picos de precipitação situados acima da linha pontilhada indicam a ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem do solo

Busscher et al. (2002) enfatizam que o volume acumulado de precipitações intensifica a reconsolidação do solo, fazendo com que o efeito da escarificação seja temporário. Segundo esses autores, em solos dotados de estrutura, a reconsolidação é fortemente influenciada pela dinâmica da água no espaço poroso inter e intra-agregados, e pode ser afetada também pelo selamento superficial ou pela estabilidade estrutural que influenciam a quantidade de água que infiltra no solo. Resultado semelhante foi encontrado por Vepraskas et al. (1995), que verificaram aumento da D_s em um solo subsolado após 2 anos, e os autores afirmam que o grande volume de chuvas durante o período de avaliação aumentou a probabilidade de compactação.

Na camada mais profunda (0,30-0,40 m) a densidade do solo antes da escarificação apresentou valor médio de $1,06 \text{ Mg m}^{-3}$, relativamente baixo para uma camada localizada a esta profundidade. Imediatamente após a escarificação, ocorreu incremento da densidade, contrariando a expectativa de redução que vinha sendo constatada nas camadas anteriores. Após seis meses da escarificação a densidade atingiu o valor máximo para esta camada ($D_s = 1,25 \text{ Mg m}^{-3}$) com uma pequena redução aos doze meses ($D_s = 1,19 \text{ Mg m}^{-3}$). A intensidade e frequência de processos naturais de alívio da compactação em subsuperfície, como ciclos de umedecimento e secagem diminuem bruscamente, aumentando a persistência da compactação em maiores profundidades (HAKÅNSSON, 2005). Pode ter ocorrido influência da escarificação em maiores profundidades, devido à remoção de camadas mais densas em superfície, pois Veiga et al. (2007) verificaram que houve aumento da resistência à penetração em profundidade após a escarificação, podendo ter sido originada pela ausência da camada compactada mais superficialmente, o que aumentaria a transmissão da pressão para camadas mais

profundas e pela homogeneização do solo após a escarificação.

A variação temporal da densidade do solo (Figura 10) mostra que a mesma foi reduzida até 0,20 m com a escarificação. Para as camadas subsequentes não foi constatada diferença de Ds entre os períodos anterior e o posterior à escarificação. Na última camada (0,30-0,40m) ocorreu um aumento da Ds, o que provavelmente se deveu à realização da escarificação em condições de solo com umidade além da recomendada. Também se verificou que o efeito da reconsolidação do solo provocou, durante o período do estudo, aumento da Ds em todas as profundidades avaliadas, com maior expressão para o período de seis meses da realização da escarificação. A reconsolidação do solo pode ter sido intensificada pelo grande volume de chuvas registrado entre a coleta de amostras feita após a operação de escarificação (maio de 2009) e a realizada seis meses após a escarificação (novembro de 2009).

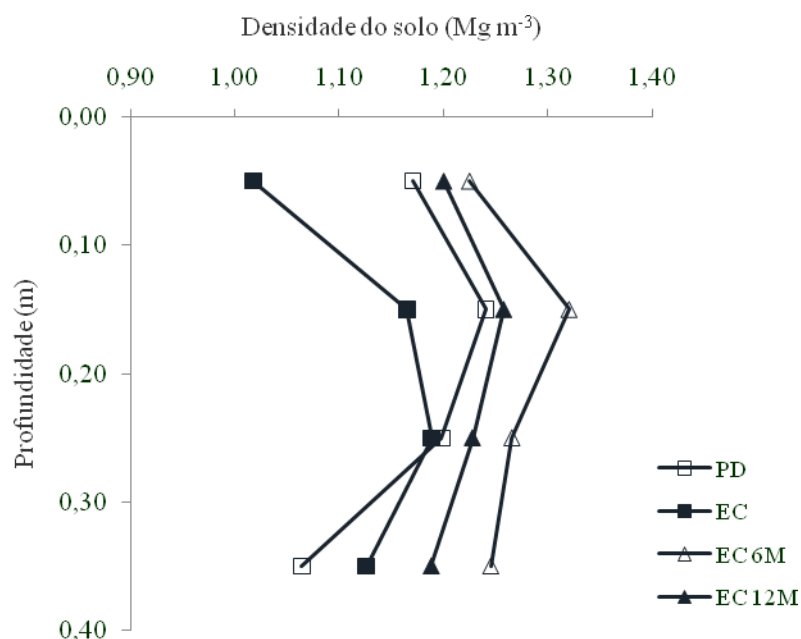


Figura 10 - Comportamento da variação temporal da densidade do solo nas profundidades estudadas. PD: plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; SB 6M: 6 meses após a escarificação; SB 12M: 12 meses após a escarificação

Seis meses após a descompactação, percebeu-se a grande capacidade de o solo retornar ao seu estado original, uma vez que, doze meses após a escarificação, a Ds diminuiu em todas as profundidades. No entanto, quando se comparam as Ds entre plantio direto antes e doze meses depois da escarificação, verifica-se que este processo promoveu um incremento da densidade do

solo no perfil. Araújo et al. (2004) observaram redução da qualidade estrutural do solo seis meses após a escarificação em camada sub-superficial. Para confirmar a tendência de retorno da densidade aos valores originais neste solo são necessárias pesquisas por períodos mais longos de tempo.

A duração dos efeitos da escarificação sobre a densidade do solo em sistema plantio direto é bastante divergente na literatura, mas a maior parte dos trabalhos confirma a sua efemeridade. Analisando a variação temporal de propriedades físicas do solo sob SPD, Reichert et al. (2009) verificaram que a D_s aumentou um ano depois da escarificação, devido à consolidação do solo e à influência dos ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura interna do solo. Busscher et al. (1995) verificou que após um ano da abertura de fendas em subsuperfície, somente 25% permaneceram no solo. Câmara e Klein (2005b) e Tormena et al. (2007) afirmam que os efeitos da escarificação permaneceram depois de seis meses. Pierce et al. (1992) encontraram efeitos residuais da descompactação mecânica sobre a densidade do solo após dois anos da escarificação. Contrariamente, Vieira e Klein (2007) não encontraram diferença significativa de D_s entre o plantio direto e o escarificado. Taylor e Beltrame (1980) afirmam que a permanência dos efeitos da escarificação depende do manejo aplicado e de características inerentes ao solo, como textura e mineralogia. Esses efeitos podem persistir por até quatro anos, desde que sejam observadas condições adequadas de manejo no momento da escarificação: umidade do solo, profundidade de trabalho, velocidade de deslocamento, número de hastes e potência do trator.

2.3.3 Grau de compactação (G_c) ou compactação relativa

Na figura 11 podem-se observar as variações do grau de compactação para períodos e profundidades de solo analisados. Após a escarificação ocorreu uma grande redução do grau de compactação na camada superficial (0,0-0,10 m), de $G_c = 88\%$ para 76%, valor este considerado baixo (LINDSTROM; VOORHEES; 1994). Segundo os autores, baixos valores de compactação relativa ($< 80\%$) podem reduzir a produtividade de alguns cereais, como o trigo e a cevada, pois o aumento excessivo da quantidade de macroporos diminui o movimento capilar de água no solo, reduzindo, por sua vez, a capacidade de armazenamento de água. Suzuki (2005) afirma que, em baixos níveis de G_c , pode ocorrer redução do contato da raiz com o solo,

prejudicando o estabelecimento inicial das plantas.

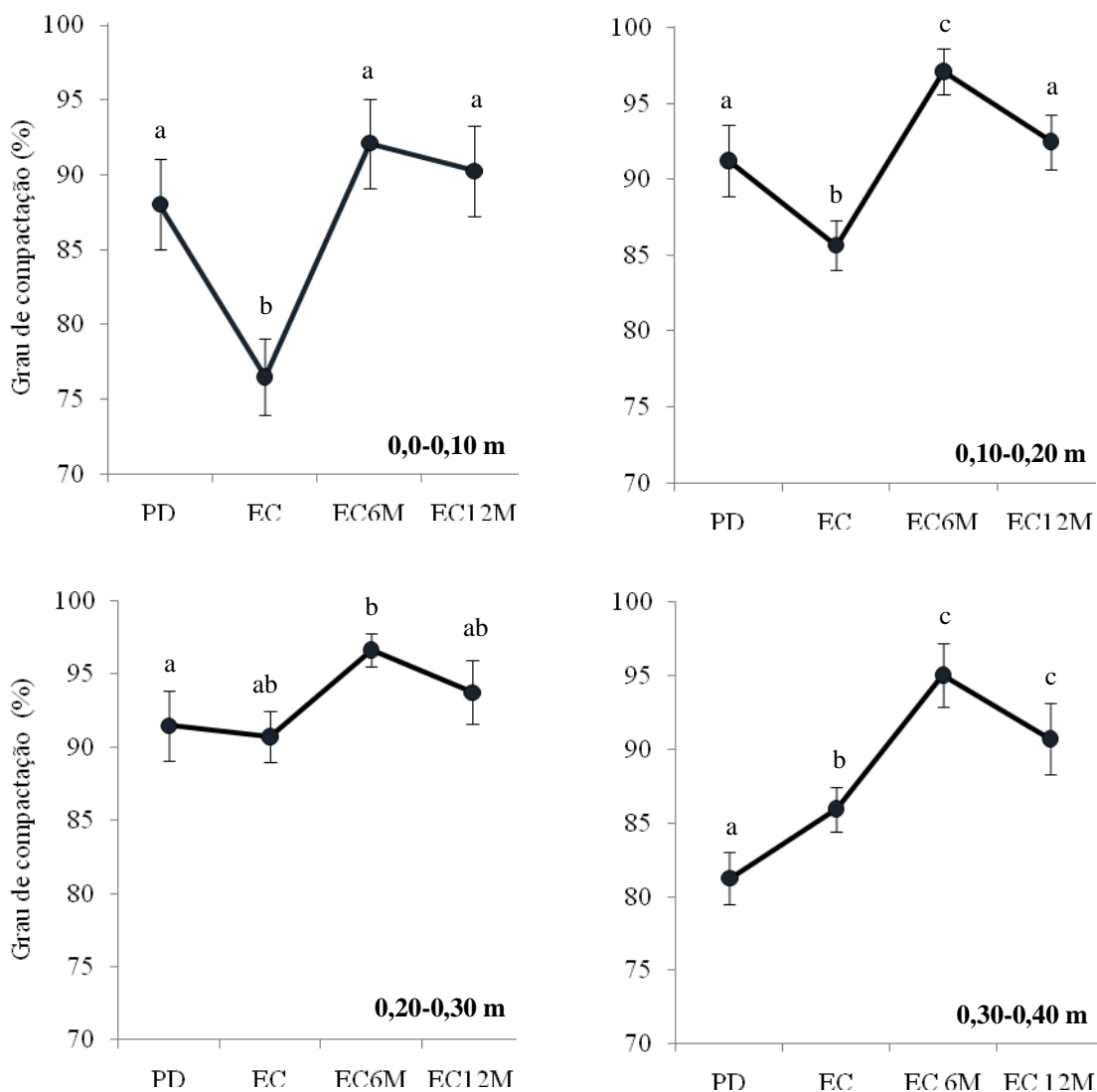


Figura 11 - Valores médios e intervalos de confiança da média para o grau de compactação do solo das épocas em estudo. PD: Plantio direto antes da escarificação; EC: Imediatamente após a escarificação; EC6M: 6 meses após a escarificação; EC12M: 12 meses após a escarificação. Letras iguais indicam sobreposição dos intervalos de confiança da média (95%)

Os resultados da Figura 11 demonstram que ocorreu uma grande recuperação do solo em função do aumento do valor de Gc depois de seis meses da escarificação (Gc de 76% para 92%). Doze meses após o mesmo processo ocorreu uma pequena redução do Gc (para 90%). A ampla variação de Gc pode ter sido causada pela maior intensidade dos ciclos de

umedecimento e secagem e atividade biológica na camada superficial do solo, favorecendo a rápida reconsolidação natural do solo após uma intervenção mecânica (BUSSCHER et al., 2002; ARAÚJO et al., 2004).

A escarificação do solo teve menor influência na camada 0,10-0,20 m em relação à camada anterior, apesar da diferença significativa entre antes e depois da escarificação. O grau de compactação imediatamente após a escarificação diminuiu para 86%, provavelmente por influência da mobilização na camada posterior. O Gc apresentou um aumento de 21% após seis meses da escarificação, alcançando valor de 97%, o que pode prejudicar a curto e médio prazo o rendimento das culturas, já que a faixa ideal de Gc que proporciona os maiores níveis de produtividade está entre 80 e 90% (HÅKANSSON, 1990; BEUTLER et al., 2005; SUZUKI et al., 2007; REICHERT et al., 2009). Um ano depois da escarificação o Gc teve uma redução para 92%, não se diferenciando estatisticamente do plantio direto não mobilizado, ou seja, o Gc retornou ao valor original, confirmando o efeito temporário da escarificação e demonstrando a grande habilidade de recuperação física ou resiliência física deste solo sob sistema plantio direto.

Na profundidade de 0,20-0,30 m, o grau de compactação não sofreu alteração entre os períodos antes e logo após a escarificação. No entanto, seis meses após a escarificação, o Gc apresentou um incremento significativo, que foi reduzido para 93% doze meses depois da mobilização. Em todos os períodos analisados, o Gc manteve-se acima de 90%, indicando um início de compactação. A frequência e a duração das perturbações impostas ao solo, como a escarificação, afetam a sua resiliência, ou seja, sua habilidade de recuperação ao estado original antes da mobilização (SEYBOLD et al., 1999).

Em subsuperfície (0,30-0,40 m), o grau de compactação apresentou comportamento crescente, atingindo o máximo de 95% no período após seis meses da descompactação, e diminuindo para 90% depois de doze meses. Mesmo com a tendência de estabilização, o Gc sofreu um incremento de 11% quando se compararam os períodos antes da escarificação e doze meses após a mesma. A camada 0,30-0,40m foi a que sofreu maior compactação, pois ao final de um ano, o Gc não se diferenciou estatisticamente dos valores apresentados antes da descompactação mecânica nas camadas superiores. Durante o período de condução do experimento foram registrados altos índices pluviométricos (Figura 2), aumentando a umidade do solo por períodos mais longos de tempo. O aumento do Gc em relação ao estado

original pode ter sido provocado pela maior susceptibilidade do solo a deformações plásticas com alta umidade no solo (GREGORY et al., 2007).

Segundo Håkansson (2005), a persistência dos efeitos da compactação aumenta em profundidade, pois a intensidade dos processos que a aliviam, como ciclos de umedecimento e secagem e atividade biológica, diminuem bruscamente. Em solos sob sistema plantio direto, a ausência de revolvimento com o contínuo tráfego de máquinas favorece o acúmulo dos efeitos da compactação, porém isso parece ser compensado em parte pela maior estabilidade da rede de macroporos, onde depois de anos de adoção do SPD se estabelece um equilíbrio dinâmico entre processos repetidos de compactação e processos naturais de descompactação (HÅKANSSON, 2005).

Solos sob plantio direto têm apresentado compactação superficial, principalmente na camada de 0,10 até aproximadamente 0,30 m, o que se confirma neste trabalho, pois os maiores valores de G_c são encontrados neste intervalo de profundidade. Para uma adequada comparação dos resultados, é importante ressaltar que o emprego do teste de Proctor para obtenção da D_{smax} , utilizada para definir o G_c , gera valores maiores de D_{smax} do que o teste de compressão uniaxial, o que pode gerar variações de G_c entre os solos de acordo com a metodologia utilizada (HÅKANSSON, 1990).

Analisando os valores do grau de compactação, não há indícios da existência de compactação, pois os valores estão situados em torno de 90%, valor que de acordo com Reichert et al. (2009), empregando o teste de compressão uniaxial para obter o G_c , ainda não atingiu valor crítico de compactação limitante às plantas. Em um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto escarificado, Klein et al. (2009), utilizando o teste de Proctor para definir o G_c , afirmam que em valores superiores a 85% as condições físicas do solo começam a limitar o pleno desenvolvimento das plantas. O solo estudado parece ter maior tolerância a valores mais elevados de G_c , pois não foi registrado queda de produtividade na área, sugerindo que o valor ótimo de G_c varia de acordo com o solo e regime hídrico local.

O valor de grau de compactação que proporciona o maior rendimento das culturas ainda não foi estabelecido na região do Paraná, porém pesquisas realizadas por Torres e Saraiva (1999) na região norte do estado mostram que o rendimento da soja decresceu a partir de um G_c de 84%, porém os autores ressaltam que o tipo de solo, de clima e a sensibilidade de cada espécie à compactação do solo, podem fazer com que os valores do grau de compactação prejudiciais ao

desempenho das culturas sejam distintos de acordo com a situação do ambiente. O Gc também pode ser afetado por vários outros fatores, como conteúdo de água no solo, vibração e patinação das rodas e frequência e duração da passagem de máquinas sobre o solo (HÅKANSSON; LIPIEC, 2000). Nas condições em que foi realizado o presente estudo pode-se inferir que a escarificação não surtiu o efeito desejado, pois a duração dos efeitos da mobilização foi efêmera, visto que dentro do período de um ano, devido à rápida reconsolidação do solo, os valores de Gc nas camadas mais superficiais não se diferenciaram do plantio direto consolidado. Na camada 0,30-0,40 m houve o efeito contrário, em razão possivelmente da redução da compactação em superfície e a transferência da pressão aplicada para camadas mais profundas no solo.

Com o conhecimento dos fatores que influenciam a dinâmica do Gc no solo, a importância da monitoração da passagem de máquinas em condições adequadas de umidade constitui em fator decisivo para evitar o surgimento de camadas compactadas e a eventual perda da qualidade física do solo.

3 CONCLUSÕES

A densidade do solo e o grau de compactação foram capazes de identificar a efemeridade da escarificação no solo, confirmando a hipótese estabelecida. A densidade do solo na área estudada apresentou aumento na camada 0,10-0,20 m, porém não atingiu valor limitante ao desenvolvimento das plantas. Os efeitos da escarificação foram observados na densidade do solo e no grau de compactação imediatamente após a sua realização, porém depois de seis meses da mobilização mecânica do solo houve um aumento expressivo, e após um ano não foi possível observar os efeitos da escarificação. O comportamento da densidade e do grau de compactação neste estudo evidencia que o processo da resiliência foi intenso em todas as profundidades avaliadas, principalmente na camada superficial, onde o solo recebe maior impacto do tráfego dos implementos agrícolas. Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que na área estudada a escarificação teve comportamento efêmero.

REFERÊNCIAS

- 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**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.
- ARAUJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 495-504, 2004.
- ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory compression experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, p. 159-170, 1998.
- ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 319-332, 1991.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management: a review. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 25, p. 335-345, 2009.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4th ed. New York: John Wiley, 1972. 489 p.
- BENJAMIN, J.G. Tillage effects on near-surface soil hydraulic properties. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p. 277-288, 1993.
- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A. de; SOUZA, F.R. de. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 681-691, 2010.
- 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, p. 365-371, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 843-849, 2005.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; MENGATTO, L.H.; ALVES, J.B.; WAGNER, G.P.C. Impacto do tráfego de máquinas na qualidade física do solo e produtividade de milho em Argissolo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, p. 359-364, 2009.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375. pt. 1: Physical and mineralogical methods.
- BLANCO-CANQUI, H.; CLAASSEN, M.M.; STONE, L.R. Controlled traffic impacts on physical and hydraulic properties in an intensively cropped no-till soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.74, p. 2142-2150, 2010.

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

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

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

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; VAN OUWERKERK, C. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264. (Developments in Agricultural Engineering, 11).

BOONE, F.R.; Van der WERF, H.M.G.; KROESBERGEN, B.; TEN HAG, B.A.; BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. II. Soil conditions and plant growth. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 35, p. 113-128, 1986.

BRADY, N.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2007. 980 p.

BUBLITZ, U. Emater divulga metodologia de acompanhamento do SPDP. **Boletim Informativo da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha**, Ponta Grossa, n. 35, p. 5, 2009.

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

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

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, p. 813-819, 2005a.

_____. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 789-796, 2005b.

CARTER, M.R. Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mouldboard ploughing and direct drilling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 12, p. 37–51, 1988.

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

CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; TOPP, G.C. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, p. 101-110, 1999.

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

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

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

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos 2009/2010**: décimo segundo levantamento. Brasília, 2010. 41 p.

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**, Viçosa, v. 27, p. 527-535, 2003.

CZYŻ, E.A.; DEXTER, A.R. Soil physical properties as affected by traditional, reduced and no-tillage for winter wheat. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, p. 319-326, 2009.

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

DEFOSSEZ, P.; RICHARD, G. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 67, p. 41-64, 2002.

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

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2006. 306 p.

EMBRAPA. INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Mapa de solos do Estado do Paraná**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Embrapa Florestas; Instituto Agrônômico do Paraná, 2008. 74 p.

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

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Área de plantio direto no Brasil**. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br>>. Acesso em: 28 set. 2010.

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

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed). **Methods of soil analysis**: 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt. 1: Physical and mineralogical methods, p. 383-411.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 65-73, 2009.

GIAROLA, N.F.B.; BRACHTVOGEL, E.L.; FONTANIVA, S.; PEREIRA, R.A.; FIOREZE, S.L. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 31, p. 641-646, 2009.

GREGORY, A.S.; WATTS, C.W.; WHALLEY, W.R.; KUAN, H.L.; GRIFFITHS, B.S.; HALLETT, P.D.; WHITMORE, A.P. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 58, p. 1221-1232, 2007.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p. 65-100, 1987.

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

_____. **Machinery-induced compaction of arable soils: incidence - consequences - counter-measures**. Uppsala: Division of Soil Management, 2005. 154 p. (Reports from the Division of Soil Management, 109).

HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 71-85, 2000.

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

HORN, R. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 68, p. 1131-1137, 2004.

HORN, R.; DEXTER, A.R. Dynamics of soil aggregation in an irrigated desert loess. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 13, p. 253-266, 1988.

- HORN, R.; DOMIALB, H.; SLOWIHKJA-JURKIEWICZB, A.; Van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 35, p. 23-36, 1995.
- IJIMA, M.; KATO, J. Combined soil physical stress of soil drying, anaerobiosis and mechanical impedance to seedling root growth of four crop species. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 10, p. 451-459, 2007.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1493-1500, 2000.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P. da; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 11-18, 2001.
- INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Cartas climáticas do Paraná**: edição ano 2000; versão 1.0. Londrina, 2000. 1 CD-ROM.
- KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S.; DORAN, J.W. Soil quality: current concepts and applications. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 74, p. 1-39, 2001.
- KAY, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v. 12, p. 1-52, 1990.
- KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. 1998. 150 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- _____. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, p. 26-32, 2006.
- KLEIN, V.A.; CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 221-227, 2007.
- KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 2475-2481, 2009.
- KUCHENBUCH, R.O.; INGRAM, K.T. Effects of soil bulk density on seminal and lateral roots of young maize plants (*Zea mays* L.). **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 167, p. 1-7, 2004.
- LANÇAS, K.P. Subsolagem ou escarificação. **Revista Cultivar Máquinas**, Pelotas, n. 14, p. 34-37, set./out. 2002.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LINDSTROM, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. van (Ed.). **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. chap. 12, p. 265-286.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p.107–136, 2003.

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 307–317, 1991.

LIPIEC, J.; MEDVEDEV, V.V.; BIRKAS, M.; DUMITRU, E.; LYNDINA, T.E. ; ROUSSEVA, S.; FULAJTÁR, E. Effect of soil compaction on root growth and crop yield in Central and Eastern Europe. **International Agrophysics**, Lublin, v. 17, p. 61–69, 2003.

LOGSDON, S.D.; KARLEN, D.L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 78, p. 143–149, 2004.

LOGSDON, S.D.; KASPAR, T.C.; CAMBARDELLA, C.A. Depth-incremental soil properties under no-till or chisel management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 197-200, 1999.

LOGSDON, S.D.; ALLMARAS, R.R.; NELSON, W.W.; VOORHEES, W.B. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 23, p. 95–110, 1992.

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

MATERECHERA, S.A.; ALSTON, A.M.; KIRBY, J.M.; DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 144, p. 297-303, 1992.

NICOLOSO, R.S.; AMADO, T.J.C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M.E.; GIRARDELLO, V.C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1735-1742, 2008.

NOGUEIRA, S.S.S.; MANFREDINI, S. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 8, p. 973-976, 1983.

PANAYIOTOPOULOS, K.P.; PAPADOPOULOU, C.P.; HATJIIOANNIDOU, A. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 323–337, 1994.

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

- PAYTON, M.E.; MILLER, A.E.; RAUN, W.R. Testing statistical hypotheses using standard error bars and confidence intervals. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p.547–551, 2000.
- PIERCE, F.J.; FORTIN, M.C.; STATON, M.J. Immediate and residual effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil physical properties and corn performance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 149–165, 1992.
- RAGHAVAN, G.S.V.; ALVO, P.; McKYES, E. Soil compaction in agriculture: a view toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, New York, v. 11, p. 1-32, 1990.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S. da; REICHERT, J.M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. v. 5, p. 49-134.
- REICHERT, J.M.; KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; RIQUELME, U.F.B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 310-319, 2009.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 242–254, 2009.
- REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A.; YANG, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, p. 252-263, 2009.
- REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; YANG, X.M.; FOX, C.A.; TAN, C.S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, p. 316–330, 2007.
- ROSA, D.P. da; REICHERT, J.M.; SATTLER, 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**, Brasília, v. 43, p. 395-400, 2008.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.
- SECCO, D.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R. da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, p. 58-64, 2009.
- SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E.; BREJDA, J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, p. 224-234, 1999.

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

SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 44, p. 81-93, 1997.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 239-249, 2000.

SILVEIRA, P.M. da; SILVA, J.G. da; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, F.J.P. Alterações na densidade e na macroporosidade de um Latossolo Vermelho-escuro causadas pelo sistema de preparo do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 29, p. 145-149, 1999.

SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **Glossary of soil science terms**. Disponível em: <<http://www.soils.org/sssagloss/>>. Acesso em 17 jun. 2010.

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**, Santa Maria, v. 34, 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. 149 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo – Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. de. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 963-973, 2008.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 111-119, 1991.

TAYLOR, J.C.; BELTRAME, L.F.S. Por que, quando e como utilizar a subsolagem. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 3, p. 34-44, 1980.

TOPP, G.C.; REYNOLDS, W.D.; COOK, F.J.; KIRBY, J.M.; CARTER, M.R. Physical attributes of soil quality. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam: Elsevier, 1997. chap. 2, p. 21-58.

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 de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998.

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

TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J.M. da. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S. da; GONÇALVES, A.C.A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 795-801, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. da; IMHOFF, S.; DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 56-60, 2008.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: EMBRAPA, 1999. 58 p. (Circular Técnica, 23).

VEIGA, M. da; 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 and Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p.104–113, 2007.

VEIGA, M. da; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Short and long-term effects of tillage systems and nutrient sources on soil physical properties of a southern Brazilian Hapludox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1437-1446, 2008.

VEPRASKAS, M.J.; BUSSCHER, W.J.; EDWARDS, J.H. Residual effects of deep tillage vs. no-till on corn root-growth and grain-yield. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 3, p. 401-405, 1995.

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

VOORHEES, W.V.; JOHNSON, J.F.; RANDALL, G.M. Corn growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 294-303, 1989.

WARRICK, A.W. Spatial variability. In: HILLEL, D. (Ed.). **Environmental soil physics**. New York: Academic Press, 1998. p. 655-675.

XU, D.; MERMOUD, A. Topsoil properties as affected by tillage practices in North China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, p. 11–19, 2001.